

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE MARINGÁ
CENTRO DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL
PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL – Mestrado**

MIGUEL BATISTA DE OLIVEIRA

**COMPÓSITO CIMENTÍCIO DE ALTA DUCTILIDADE
REFORÇADO COM FIBRAS**

MARINGÁ
2016

MIGUEL BATISTA DE OLIVEIRA

**COMPÓSITO CIMENTÍCIO DE ALTA DUCTILIDADE
REFORÇADO COM FIBRAS**

Dissertação apresentada como parte dos requisitos necessários para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil do Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil da Universidade Estadual de Maringá.

Orientador: Prof. Dr. Romel Dias Vanderlei

MARINGÁ
2016

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
(Biblioteca Central - UEM, Maringá, PR, Brasil)

O48c Oliveira, Miguel Batista de
Compósito cimentício de alta ductilidade
reforçado com fibras / Miguel Batista de Oliveira. -
- Maringá, 2016.
98 f. : il. color., figs., tabs.

Orientador: Prof. Dr. Romel Dias Vanderlei.
Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual de
Maringá, Centro de Tecnologia, Departamento de
Engenharia Civil, Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Civil, 2016.

1. Compósito cimentício. 2. Fibras de
Polipropileno. 3. Ductilidade do concreto. I.
Vanderlei, Romel Dias, orient. II. Universidade
Estadual de Maringá. Centro de Tecnologia.
Departamento de Engenharia Civil. Programa de Pós-
Graduação em Engenharia Civil. III. Título.

CDD 21.ed. 624.1834

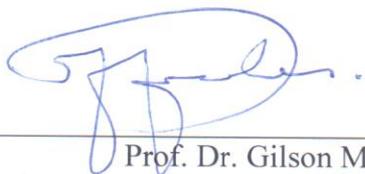
GVS-003691

MIGUEL BATISTA DE OLIVEIRA

COMPÓSITO CIMENTICIO DE ALTA DUCTILIDADE
REFORÇADO COM FIBRAS

Dissertação apresentada à Universidade Estadual de Maringá, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, na área de concentração Infra-estrutura e Sistemas Urbanos, para obtenção do título de Mestre.

APROVADA em 31 de agosto de 2016.



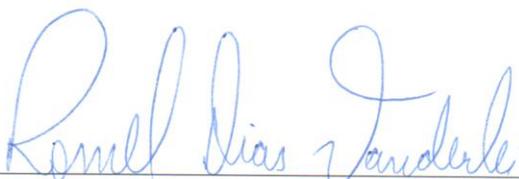
Prof. Dr. Gilson Morales

Membro CTU/ UEL



Prof. Dr. Vladimir José Ferrari

Membro UEM



Prof. Dr. Romel Dias Vanderlei

Orientador

À minha esposa Sônia, pelo constante apoio e incentivo ao longo desta caminhada.

AGRADECIMENTOS

A Deus, pelos momentos;

À Universidade Estadual de Maringá pela oportunidade de realização do curso;

Ao Instituto Federal do Paraná Campus Foz do Iguaçu pela contribuição e disposição do espaço físico para desenvolvimento desta pesquisa;

Ao Laboratório de Tecnologia do Concreto da Itaipu por ter cedido o espaço físico para desenvolvimento da pesquisa;

Às empresas Cimentos Itambé Ltda., Brasilit Saint Gobain, Tecnosil Sílica Ativa, Grace Brasil, Districal Materiais de Construção Ltda. e Marcenaria CBE Ltda. pelo fornecimento dos insumos para realização dos estudos e a seus funcionários pelo excelente atendimento;

Ao Professor Dr. Romel Dias Vanderlei pela orientação durante a elaboração deste trabalho;

Aos professores do programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, pelo apoio e dedicação prestada durante o curso;

Aos servidores do Laboratório de Tecnologia do Concreto, engenheiro civil Fábio Luiz Willrich, ao técnico em construção civil João Albertino e ao Engenheiro civil Mauricio Kazuto Ichikawa, pelo tempo e dedicação durante as etapas dos ensaios realizados;

Aos meus pais, João Batista de Oliveira e Iraci Morelli de Oliveira, por estarem comigo, e aos meus irmãos pelo apoio;

À minha família, em especial a minha esposa Sônia Maria Zanette de Oliveira pela dedicação e esforço nas horas difíceis e aos meus filhos João Luís e Luís Miguel pelo tempo cedido;

A todos os colegas do curso pela oportunidade da amizade, em especial aos colegas Adriano, Juliana e Michel Albertin;

Aos alunos do curso de Edificações do IFPR, pela parceria durante o período de estudo;

Às professoras Kayla Garmus, Fernanda Rubio e Edilene Queiroz pelo apoio e amizade.

A quem passe pelo bosque e só veja lenha para a fogueira.

Leon Tolstoi

RESUMO

A prática da adição de fibras ao material cimentício iniciou-se na década de 60. Desde então, várias pesquisas foram desenvolvidas com o intuito de proporcionar melhorias no comportamento dos materiais cimentícios, e conseqüentemente, contribuir para as aplicações do material na construção civil. O cimento é considerado um material frágil, portanto, a adição de fibras proporciona ganhos em sua resistência à tração e controle de fissuração. Dito isto, a finalidade deste trabalho é apresentar um compósito cimentício de alto desempenho através da adição de fibras de polipropileno para dar ao material concreto ganho em ductilidade visando a produção de materiais no mercado nacional, tomando como referência as propriedades de ductilidade encontradas no Engineered Cementitious Composites (ECC). A base principal deste estudo é a produção de um compósito que apresente propriedades de alta ductilidade, a partir de materiais encontrados na região do Paraná. Para esta pesquisa, foram desenvolvidos 16 traços de um compósito cimentício com adição de sílica ativa e areia natural, incorporando fibras de polipropileno de alta tenacidade. Os traços foram ensaiados segundo critérios da norma europeia RILEM, buscando-se resultados que demonstrem a ductilidade do compósito cimentício. Dentre os compósitos estudados, o que continha 2% de fibra apresentou os melhores resultados em relação ao ganho em ductilidade. Também foram estudadas as dosagens de sílica ativa nos traços, a partir das quais pode-se concluir que a adição de fibra e sílica ativa produz grandes mudanças no comportamento do compósito, melhorando sua resistência à tração e ductilidade.

Palavras-chave: Compósito, Fibras de Polipropileno, Ductilidade do concreto.

ABSTRACT

The practice of adding fibers to the cementitious materials began in the decade of 60. Since then, various researches have been developed in order to provide improvements in the behavior of the cementitious materials and thereby contribute to the applications of the material in construction. The cement is considered a brittle material, therefore the addition of fibers provides gains to their resistance to traction and control cracking. That said, the purpose of this paper is to present a high performance cementitious composite by adding polypropylene fibers to give the gain of ductility to the concrete material aiming producing materials in the national market, with reference to ductility properties found in Engineered Cementitious Composites (ECC). The main base of this study is to produce a composite which present high ductility properties from materials found in the Parana. For this study, it were developed 16 traits of a cementitious composite with the addition of silica fume and natural sand, incorporating high tenacity polypropylene fibers. The traits were tested according to the criteria of the European standard RILEM, seeking results that demonstrate the ductility cementitious composite. Among the composites studied, which contained 2% fiber showed the best results in relation to the gain in ductility. Also the active silica levels were studied in traits, from which it can be concluded that the addition of fiber and active silica produces major changes in the composite behavior, improving its tensile strength and ductility.

Keywords: Composite, Polypropylene fibers, Concrete ductility.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Comportamento das matrizes cimentícias	16
Figura 2.2 - Curvas tensão-deformação à tração características de um ECCs e de um concreto convencional [Adaptado de Qian, 2007]	20
Figura 2.3 - Sílica Ativa em pó.....	22
Figura 2.4 - Curva tensão-deformação de um fio de polipropileno.....	27
Figura 2.5 - Método de cálculo de ductilidade	29
Figura 2.6- Configuração geral do ensaio	31
Figura 2.7 - Critérios da RILEM para avaliação do comportamento de materiais com fibras.	31
Figura 3.1 - Areia média do rio Paraná	35
Figura 3.2 - Fibra de Polipropileno de alta tenacidade.....	38
Figura 3.3 - Aditivo Superplastificante de base policarboxílica	39
Figura 3.4 - Croqui do funil utilizado para o ensaio de cone de Marsh	41
Figura 3.5 - Ensaio de compressão	42
Figura 3.6 - Ensaio de módulo de elasticidade.....	42
Figura 3.7 - Configuração para ensaio de flexão.....	43
Figura 4.1 - Fluxograma para traço experimental em estudo	45
Figura 4.2 – Detalhe do entalhe no corpo de prova.....	47
Figura 4.3- Aparelho YOKE montado no corpo de prova	47
Figura 4.4 - Dispositivos utilizados nos ensaios	48
Figura 4.5 - Equipamentos utilizados nos ensaios.....	49
Figura 4.6 - Materiais para dosagem do compósito.....	51
Figura 4.7 - Aspecto do compósito após a mistura	52
Figura 4.8 – Forma de madeira para moldagem dos corpos de prova.....	52
Figura 4.9 - Moldagem dos corpos de prova	53
Figura 5.1 - Comparativo da resistência à compressão do compósito	55
Figura 5.2 - Análise da resistência à compressão pela adição de sílica ativa e fibras	55
Figura 5.3 - Comparativo do Módulo de elasticidade do compósito	56
Figura 5.4-Análise dos resultados do módulo de elasticidade pela adição de sílica e fibra.....	57
Figura 5.5 - Curva $F_x \delta$ do compósito T10-2/11.....	57
Figura 5.6 – Avaliação pelos critérios da RILEM para o compósito T10-2/11	58
Figura 5.7 - Gráfico das forças máximas de <i>offset</i> (F_L) e forças máximas do compósito (F_M)	59
Figura 5.8 - Gráfico Força x Deslocamento vertical do compósito.....	60
Figura 5.9 - Relação entre resistência residual e resistência da matriz	61
Figura 5.10 - Gráfico dos valores das resistências do compósito.....	61
Figura 5.11 – Ganho na resistência flexional equivalente do compósito	62
Figura 5.12 - Fissuramento do CDRF após carregamento	62
Figura 5.13 - Curvas CMOD dos compósitos	63
Figura 5.14 - Compósito com 0% de fibra	64
Figura 5.15 - Compósito com 1% de fibra	65
Figura 5.16 – Compósito com 2% de fibra.....	66
Figura 5.17 - Compósito com 3% de fibra	67
Figura 5.18 - Gráfico Força x Deslocamento vertical em função da porcentagem de sílica ativa 50%	68
Figura 5.19 - Compósito com 0% de sílica ativa.....	69
Figura 5.20 - Compósito com 5% de sílica ativa.....	70
Figura 5.21 - Compósito com 10% de sílica ativa.....	71
Figura 5.22 - Compósito com 50% de sílica ativa.....	72

LISTA DE TABELAS

Tabela 4.1 - Traço Experimental	46
Tabela 5.1 - Resultados médios do ensaio a compressão do compósito	54
Tabela 5.2 – Forças e resistências conforme RILEM (2002).....	58

LISTA DE QUADROS

Quadro 3.1 - Características químicas do cimento CP V-ARI.....	34
Quadro 3.2 - Características físicas do cimento CP V-ARI	34
Quadro 3.3 - Resistência característica para CP-V, segundo ABNT	34
Quadro 3.4 - Determinação da massa específica da areia	35
Quadro 3.5 - Ensaio granulométrico para caracterização da areia	36
Quadro 3.7 - Características Físicas e Químicas da Sílica Ativa Tecnosil.....	37
Quadro 3.8 - Características da fibra de polipropileno.....	38
Quadro 3.9 - Característica do aditivo superplastificante.....	39
Quadro 4.1 - Características técnicas dos equipamentos e instrumentos	49
Quadro 4.2 - Composição para produção do compósito	50

LISTA DE ABREVIATURAS

MPa	Mega Pascal
CFR	Concretos reforçados com fibras
PVA	Poliacetato de vinila
HPFRCC	1 <i>High Performance Fiber Reinforced Cementitious Composites</i>
ECC	<i>Engineered Cementitious Composites</i>
HDFRCC	<i>High Ductility Fiber Reinforced Cementitious Composites</i>
DSP	<i>Densified Small Particle</i>
MDF	<i>Macro Defect Free</i>
FRC	<i>Fiber Reinforced Concrete</i>
SIFCON	<i>Slurry Infiltrated Fiber Concrete</i>
EUA	Estados Unidos da América
CDRF	Compósito dúctil reforçado com fibras
CP V ARI	Cimento Portland de alta resistência inicial
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
NBR	Norma Brasileira
EB	Normas de Especificação (ABNT)
NM	Normatização no Mercosul
ACI	<i>American Concrete Institute</i>
°C	Graus Celsius
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
RILEM	<i>International Union of Laboratories and Experts in Construction Materials, Systems and Structures</i>
CMOD	Deslocamento de abertura da entrada do entalhe
N	Newton
N/mm ²	Newton por milímetros quadrado
mm	Milímetros
GPa	Giga Pascal
kN	Quilo Newton
mm ²	Milímetros quadrados
IFPR	Instituto Federal do Paraná

LISTA DE SÍMBOLOS

D_{BZ}^b	parcela de absorção de energia pela matriz cimentícia
D_{BZ}^f	parcela de absorção de energia pelas fibras
$D_{BZ,3}^f$	parcela de absorção de energia pelas fibras
E_{cs}	módulo secante de deformação do concreto
F_L	força máxima de offset
F_M	força máxima suportada pelo CDRF
$F_{R,1}$	força correspondente ao deslocamento vertical $\delta R1$
$F_{R,4}$	força correspondente ao deslocamento vertical $\delta R4$
L	comprimento do elemento (corpo-de-prova)
b	largura do elemento (corpo-de-prova)
h	altura do elemento (corpo-de-prova)
P	força aplicada
δ	deslocamento vertical
δL	deslocamento vertical correspondente à força F_L
$\delta R1$	deslocamento vertical do corpo-de-prova igual a 0,46mm
$\delta R4$	deslocamento vertical do corpo-de-prova igual a 3,0mm
a/c	relação água/cimento
a/mc	relação água/material cimentício
f_{ck}	resistência característica à compressão do concreto
f_{cm}	resistência média à compressão do concreto
$f_{ct,f}$	resistência à tração do concreto na flexão
$f_{eq,2}; f_{eq,3}$	resistências flexionais equivalentes tensão
$f_{fct,L}$	tensão correspondente à força F_L
$f_{R,1}; f_{R,4}$	resistências flexionais residuais
h_{sp}	distância do topo do entalhe até a face superior do corpo-de-prova
$F \times \delta$	força x deslocamento vertical

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	12
1.1	JUSTIFICATIVA	13
1.2	OBJETIVOS	14
1.2.1	Objetivo geral	14
1.2.2	Objetivos específicos	14
1.2.3	Estrutura do Trabalho	14
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	16
2.1	MATERIAIS CIMENTÍCIOS REFORÇADOS COM FIBRAS	16
2.1.1	Escolha dos materiais	21
2.2	COMPORTAMENTO MECÂNICO DAS FIBRAS DE POLIPROPILENO	26
2.2.1	Tenacidade	27
2.2.2	Ductilidade.....	28
2.2.3	Caracterização da ductilidade no CRF	28
2.3	MÉTODO RILEM-TC 162-TDF (2002).....	30
2.3.1	Forças e resistências	31
3	MATERIAIS E MÉTODOS	34
3.1	CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS	34
3.1.1	Cimento CP-V ARI.....	34
3.1.2	Areia natural	35
3.1.3	Sílica Ativa	37
3.1.4	Fibras de Polipropileno.....	37
3.1.5	Aditivo Superplastificante	38
3.1.6	Água.....	39
3.2	MÉTODOS DOS ENSAIOS	39
3.2.1	Compatibilidade do Cimento CP V-ARI e o Aditivo Superplastificante	39
3.2.2	Ensaio de compressão em corpos-de-prova cilíndricos	41
3.2.3	Ensaio do módulo de elasticidade em corpos-de-prova cilíndricos.....	42
3.2.4	Ensaio de flexão em corpos-de-prova entalhados.....	42
4	DOSAGEM.....	44
4.1	ESTUDO DO TRAÇO	44
4.2	INSTRUMENTAÇÃO E CONFIGURAÇÃO DO ENSAIO.....	46
4.3	PROGRAMA DE ENSAIOS	49

4.4	PREPARAÇÃO DOS COMPÓSITOS.....	50
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	54
5.1	ENSAIO DE COMPRESSÃO E MÓDULO DE ELASTICIDADE	54
5.2	ENSAIO DE TRAÇÃO NA FLEXÃO	57
5.2.1	Curvas CMOD	63
5.2.2	Considerações quanto a dosagem do CDRF.....	68
6	CONCLUSÃO	73
7	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	74
	APÊNDICE A - Determinação do fator s_p/c	79
	APÊNDICE B – Gráfico dos ensaios realizados	82

1 INTRODUÇÃO

Ao longo dos anos, o concreto vem sendo estudado com a finalidade de obter melhorias de qualidade e desempenho. Estas conquistas podem ser vistas nos produtos encontrados hoje no mercado, como os concretos de Alto desempenho, Ultra Alta Resistência e concretos ecológicos. Porém, a fragilidade do concreto sempre foi seu ponto fraco. Sua resistência à compressão elevada não lhe permite deformação e sua resistência à tração é quase inexistente.

Com o intuito de melhorar as propriedades físicas e o comportamento do concreto após o início da fissuração, várias adições de fibras foram desenvolvidas para o mesmo, surgindo assim os concretos reforçados com fibras (CFR), (FIGUEIREDO, 2011). As fibras de aço lhe proporcionaram resistência e controle de fissuras, enquanto as de carbono aumentaram sua resistência a tratamentos patológicos e reforços estruturais, logo passando a serem utilizadas às fibras poliméricas. As fibras de PVA, polietileno, vidro e polipropileno adicionadas ao material concreto, lhe permitiram controle de fissuras, com ganhos consideráveis na sua característica de deformação, desenvolvendo assim os compósitos cimentícios de alto desempenho, reforçados com fibras HPFRCC (*High Performance Fiber Reinforced Cementitious Composites*), porém com elevado teor de fibra.

Com as adições de fibras ao concreto, as pesquisas buscaram promover melhorias na sua resistência à tração e diminuir sua fragilidade, valorizando ~~assim~~ uma característica pouco comum ao concreto (SALVADOR, 2013).

Estudos para o desenvolvimento de concretos com técnicas especiais de concepção e fabricação dos HPFRCCs procuram obter ganhos consideráveis na ductilidade do material concreto, utilizando baixos teores de fibras (LI, 2007). Resultando assim, num grupo de materiais atualmente conhecidos como *Engineered Cementitious Composites - ECC*, e os *High Ductility Fiber Reinforced Cementitious Composites - HDFRCC*, desenvolvidos como uma solução para suprir a principal deficiência observada nos concretos convencionais relacionada ao seu comportamento à tração.

Os compósitos ECCs, devido a sua propriedade de ductilidade, têm várias aplicações na engenharia, tanto como reforço estrutural, quanto em aplicações estruturais e pré-moldados (LI, 2007).

Os ECCs devem ser confeccionados atendendo às características da obra na qual serão aplicados e podem ter suas propriedades modificadas, sem perderem sua resistência e comportamento dúctil (LI, 2007).

A partir deste, pretende-se desenvolver um compósito cimentício reforçado com fibras de polipropileno, por meio de materiais disponíveis na região do Paraná, dando-lhe a propriedade de ductilidade quando submetido a esforços de tração, característica essa encontrada no ECC, citado em outras pesquisas.

1.1 JUSTIFICATIVA

Nas três últimas décadas, muitas pesquisas e desenvolvimentos promoveram avanços e melhorias no desempenho dos concretos para aplicação e uso de forma racional e mecanizada na indústria da construção. Desenvolvimentos significativos surgiram para a tecnologia de concreto de alta resistência, que objetiva a melhoria das propriedades mecânicas, especificamente (NUNES, 2001).

Quanto ao aspecto material, nas últimas décadas tem ocorrido uma notável mobilização por parte da comunidade científica e da indústria da construção civil em torno da utilização de concretos com características elevadas de desempenho (BORGES, 2002).

As fibras promoveram alterações substanciais na qualidade do concreto, proporcionando melhorias tanto em sua trabalhabilidade e resistência mecânica, quanto no controle de fissuras e em sua deformabilidade e durabilidade (FIGUEIREDO, 2011).

Este trabalho atribui ênfase a um produto novo, que vem ganhando o mercado dos concretos, o ECC – *Engineered Cementitious Composites*, assim denominado para diferenciar uma categoria nova dos concretos com adições de fibra, popularmente chamados CRF - concretos reforçados com fibras e o HPRFCC - compósitos cimentícios de alto desempenho reforçados com fibras.

O ECC pode ser considerado como uma família de materiais com uma gama de forças de tração e ductilidade, ajustáveis em função das exigências de uma estrutura particular. Também representa uma família de materiais com diferentes funcionalidades para além das características comuns de alta ductilidade à tração e microfissuramento controlado (GARCEZ, 2009).

Por conseguinte, busca-se reproduzir um compósito que tenha as propriedades semelhantes ao ECC, tendo como matéria prima materiais locais.

Considerando que o ECC é um material recente e de características diferenciadas, a presente pesquisa justifica-se pela necessidade de e aprimoramentos que disseminem esta

tecnologia no meio científico, visando seu desenvolvimento com materiais regionais e à avaliação da interferência desses materiais nas suas propriedades.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo geral

Esta pesquisa visa a desenvolver um compósito cimentício de alto desempenho com materiais encontrados na região.

1.2.2 Objetivos específicos

Como objetivo específico, esta pesquisa pretende:

- 1) Utilizar materiais cimentícios e agregados disponíveis na região,-além de fibras de alta tenacidade para desenvolver um compósito cimentício que apresente grande capacidade de deformação quando solicitado a esforços de flexão;
- 2) Verificar a resistência à compressão do compósito com diferentes teores de fibras e sílica ativa;
- 3) Averiguar o módulo de elasticidade do compósito com diferentes teores de fibra e sílica ativa;
- 4) Investigar a ductilidade do compósito através de ensaio de resistência a tração na flexão com diferentes teores de fibra e sílica ativa.

1.2.3 Estrutura do Trabalho

Este trabalho está dividido em 7 capítulos. O primeiro capítulo aborda a introdução ao assunto e uma descrição da justificativa do tema e dos objetivos da pesquisa.

O capítulo 2 apresenta a revisão bibliográfica sobre os fundamentos teóricos utilizados para a criação dos compósitos cimentícios de alto desempenho reforçados com fibras e o seu comportamento mecânico.

O capítulo 3 aborda a metodologia e os materiais empregados na pesquisa, sua caracterização e os ensaios.

O capítulo 4 traz o programa experimental—e demonstra a dosagem do traço do compósito e sua preparação.

O capítulo 5 discorre sobre os resultados obtidos na pesquisa.

A conclusão e as referências bibliográficas encontram-se nos capítulos 6 e 7, respectivamente.

Ao final, encontram-se anexados os resultados e gráficos obtidos durante os ensaios.

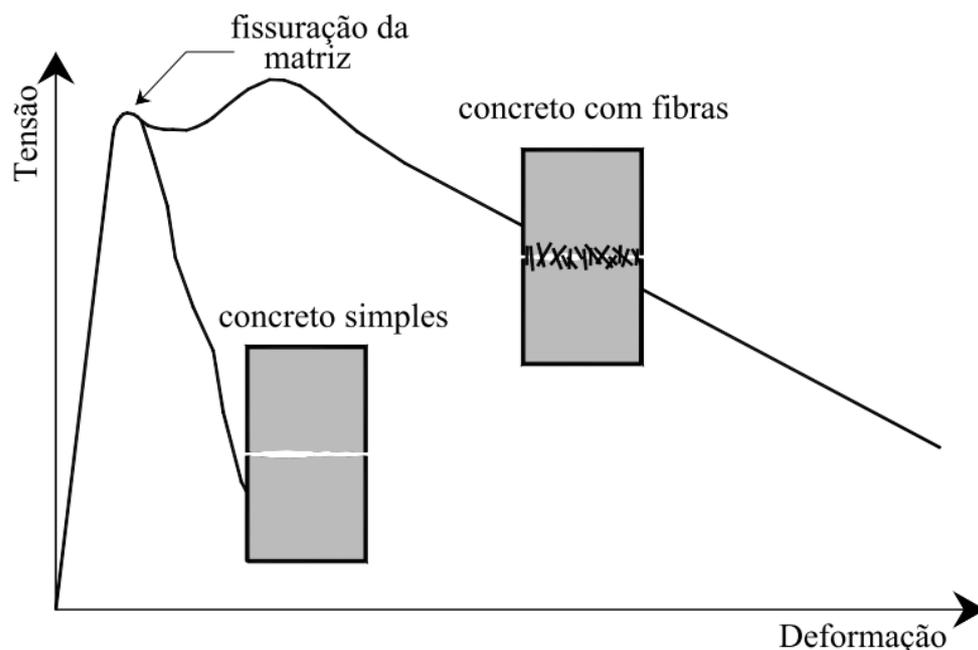
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 MATERIAIS CIMENTÍCIOS REFORÇADOS COM FIBRAS

Segundo Ferrari (2007), o concreto é o material mais largamente usado na construção. Estima-se que o seu consumo mundial anual seja de seis bilhões de toneladas, ou seja, é o segundo bem de consumo mais utilizado pelo homem, só perdendo para a água. É popularmente conhecido pela sua facilidade de produção e versatilidade.

Entretanto, a matriz cimentícia de concretos e argamassas tem baixa resistência à tração em relação a sua resistência à compressão e baixa capacidade de deformação, o que faz com que perca quase que imediatamente a sua resistência após o surgimento da primeira fissura, como ilustrado na Figura 2.1 (FERRARI, 2007).

Figura 2.1 - Comportamento das matrizes cimentícias



Fonte: Ferrari (2007)

Ferrari (2007) pontua que a incorporação de fibras dos mais variados tipos, como fibras metálicas, minerais e poliméricas, de elevada resistência à tração e ductilidade, a matriz cimentícia pode melhorar a sua capacidade de carga e de deformação. A presença dessas fibras não melhora a resistência à tração da matriz, mas mantém uma capacidade portante pós-fissuração, suportando deformações bem maiores do que a matriz sem fibra.

Os concretos reforçados, tanto com fibras, quanto com barras ou fios de aço, são exemplos de materiais compostos, também conhecidos como compósitos, (FIGUEIREDO, 2011).

De acordo com Oliveira (2005), as fibras com módulo de elasticidade menor e alongamento maior do que as matrizes de cimento, como por exemplo, as fibras de polipropileno e polietileno, são capazes de absorver grandes quantidades de energia, proporcionando elevada tenacidade. Entretanto, não contribuem muito para o aumento da resistência do compósito.

Segundo Brandão (2005), os concretos de alto desempenho reforçados com fibras (HPFRC) são um dos principais resultados da série de pesquisas desenvolvidas no final do século XX, com o intuito de encontrar alternativas para aumentar a resistência mecânica do concreto.

Garcez (2009) acrescenta que os objetivos foram atingidos com base em duas abordagens distintas: A primeira com a criação do DSP - *Densified Small Particle*, concretos desenvolvidos com agregados extremamente resistentes e alto teor de superplastificantes, contribuindo para uma relação água/aglomerante muito baixa. A adição de sílica ativa, por sua vez, resulta em um material altamente empacotado.—Este concreto tem resistência à compressão variável de 150 a 400 MPa, porém, sua relação entre resistência à tração e à compressão permanece baixa.

Outra abordagem, segundo Garcez (2009), compreende o MDF - Macro Defect Free, uma argamassa de base cimentícia modificada pela adição de polímeros. O compósito resultante do processo de polimerização tem seus poros preenchidos, mantendo as partículas aderidas, possibilitando a criação de uma matriz resistente, com elevada resistência à flexão, superior a 150MPa.

Em ambos os casos, os materiais resultantes se mostram muito resistentes e compactos, porém apresentam comportamento frágil na ruptura, característica indesejada em elementos estruturais. A adição de fibras a estes compósitos foi, portanto, uma consequência natural, dado que esta é uma estratégia bem conhecida para controlar a fissuração e aumentar a ductilidade de matrizes frágeis, (Garcez, 2009).

Os concretos do tipo MDF são materiais naturalmente viscosos, então, a adição de fibras pode ser difícil e problemática, visto que tendem a reduzir a trabalhabilidade das misturas, o que prejudica a compacidade e em alguns casos, favorecem a incorporação de ar.

Assim, os pesquisadores da área se concentraram no estudo da adição de fibras a matrizes do tipo DSP, desenvolvendo um material atualmente conhecido como concreto de

alto desempenho reforçado com fibras – HPFRC (High Performance Fiber Reinforced Concrete).

A capacidade de múltipla fissuração e o comportamento de endurecimento sob deformação (*strain-hardening*) são as principais características que diferenciam e justificam o comportamento estrutural dos concretos reforçados com fibras tradicionais (normalmente designados pela sigla em inglês FRC – Fiber Reinforced Concrete) e dos compósitos cimentícios de alto desempenho reforçados com fibras (identificados pela sigla HPFRC), (Garcez, 2009).

Com o desenvolvimento do HPFRC, muitos outros compósitos cimentícios com adição de fibras e características especiais começaram a ser desenvolvidos, viabilizando principalmente o teor de fibra incorporado.

A principal vantagem dos compósitos com altos teores de fibras é o ganho de ductilidade proporcionado. Embora não atinjam resistências tão elevadas (por não terem, ao contrário dos HPFRC, uma matriz ultracompacta), sob ação de esforços uniaxiais de tração, os SIFCON exibem uma relação constitutiva pós-pico de carregamento caracterizado pelo comportamento *strain-hardening* e pelo desenvolvimento de um processo de múltipla fissuração, resultando em um compósito de comportamento bastante dúctil, (GARCEZ, 2009).

Ainda de acordo com Garcez (2009), seguindo esta vertente de desenvolvimento, alguns pesquisadores começaram a utilizar técnicas especiais de concepção e fabricação de HPFRCs, buscando aumentar a ductilidade sem ter que utilizar teores de fibras tão elevados. Isto resultou num grupo de materiais conhecido atualmente como Engineered Cementitious Composites - ECC, também chamados de High Ductility Fiber Reinforced Cementitious Composites - HDFRCC, desenvolvidos como uma solução para suprir a principal deficiência observada nos concretos convencionais, relacionada ao seu comportamento à tração.

Os ECCs diferenciam dos CRFs e HPRFCs por suas propriedades mecânicas, tendo como principal delas a ductilidade e propriedade de tração elevada, comparada a outros concretos, enquanto que os HPRFC têm uma elevada resistência à tração e baixa ductilidade, o ECC tem uma ductilidade elevada e tem sua resistência à tração moderada.

Segundo Li (2007), a abordagem de desenvolvimento para essas duas classes de materiais é bastante diferente. Comparado ao *Ductal*® no ECC, a abordagem cria interações sinérgicas entre fibras, matriz e interface, para maximizar a ductilidade à tração pelo desenvolvimento de múltiplas microfissuras espaçadas, minimizando o teor de fibra (geralmente 2% ou menos em volume) enquanto no *Ductal*® a abordagem emprega uma

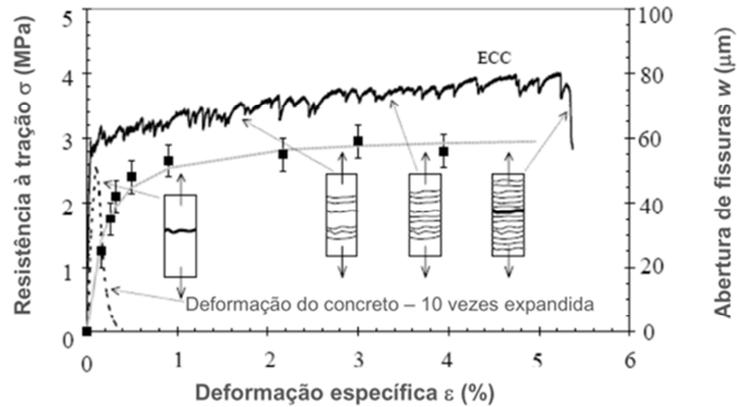
matriz densa bem embalada para aumentar a resistência à tração e resistência à compressão do material, a fibra é adicionada para neutralizar a alta fragilidade, resultante da matriz densificada, sendo que esta matriz densa permite uma forte ligação com a fibra, que resulta numa força pós-fissuração alta, enquanto uma fibra com elevada resistência é utilizada (LI, 2007).

De acordo com Li (2007), os ECCs são compósitos cimentícios de alta ductilidade, reforçados com fibras, que foram projetados para resistir a elevadas tensões de tração e cargas de cisalhamento, com adições máximas de fibras de apenas 2%. Devido à sua elevada ductilidade, tais compósitos possuem elevada capacidade de absorção de energia e alta capacidade de deformação sob carregamentos de tração, resultado da capacidade de formação de diversas fissuras múltiplas de pequena abertura durante o processo de ruptura destes compósitos.

O nome *Engineered Cementitious Composites* (ECC) foi adotado pelos desenvolvedores originais para enfatizar a base micromecânica por trás do design deste material. A micromecânica serve como uma poderosa ferramenta para orientar a elaboração de materiais para as propriedades de compósitos visados, e permite uma ligação significativa entre a engenharia de materiais e design desempenho estrutural (LI, 2007).

Segundo Li (2007), os ECCs são uma categoria especial de compósitos cimentícios, pois apresenta curvas de tensão–deformação quando submetidos à tração, semelhantes às que são registradas nos ensaios de materiais metálicos, como mostrado na figura 2.2. Verifica-se na figura que um ECC típico apresenta um comportamento que permite que se atinjam níveis de deformação específica superiores a 5%, enquanto os concretos convencionais falham quando a deformação específica atinge patamares da ordem de 0,01%.

Figura 2.2 - Curvas tensão-deformação à tração características de um ECC e de um concreto convencional



Fonte: Garcez, 2009

O ECC apresenta características diferenciadas em relação aos demais compósitos reforçados com fibras utilizados na engenharia. Trata-se de um produto novo, portanto, ainda não existem estudos e resultados concretos sobre a aplicação do mesmo. (GARCEZ, 2009).

Devido a elevada capacidade de deformação à flexão dos ECCs, eles são conhecidos, de forma popular, como concreto flexível. Sua principal aplicação ocorre na criação de elementos resistentes a sismo, a elevados esforços de flexão e cisalhamento ou de elementos que necessitam ser resistentes à fadiga. Os compósitos também podem ser utilizados com vantagem para retrofit sísmico ou aplicados na proteção da superfície de elementos estruturais existentes, como o intuito de prolongar sua vida útil.

O desenvolvimento do ECC ainda está em evolução, apesar de que uma série de aplicações estruturais em grande escala já tenham aparecido no Japão, Europa e EUA (LI, 2007).

Dessa forma, a revisão bibliográfica levou à criação de um CDRF (Compósito Dúctil Reforçado com Fibras) a partir da utilização e aplicação de produtos encontrados no mercado local, como cimentos CP-V ARI, areia natural do Rio Paraná, sílica ativa em pó, superplastificante de base policarboxílica e fibra de polipropileno; Todos esses materiais terão suas características descritas no decorrer do texto.

2.1.1 Escolha dos materiais

2.1.1.1 Cimento CP-V-ARI

O cimento CP-V-ARI, denominação dada pela norma técnica ABNT-NBR 5733 (1991), contém adição de até 5% de filer calcário, tem alta resistência inicial e alta reatividade em baixas idades em função do grau de moagem a que é submetido.

O clínquer é o mesmo utilizado para a fabricação de um cimento convencional, mas permanece no moinho por um período maior. O cimento continua ganhando resistência durante 28 dias, atingindo valores mais elevados que os demais, o que proporciona maior resistência ao concreto. É largamente utilizado em produção industrial de artefatos, em que se exige desforma rápida, concreto protendido pré e pós-tencionado, pisos industriais e argamassa armada.

A resistência à compressão aos 28 dias do CP- V-ARI é regida pela NBR 5733 (1991), a qual não estabelece valor mínimo.

2.1.1.2 Areia natural

Segundo a NBR 7211 – EB 4 (ABNT, 2005), a areia é classificada como agregado miúdo, material cujos grãos passam pela peneira ABNT 4,8mm e ficam retidos na peneira ABNT 0,075mm. Também se pode defini-la como material granular, sem forma e volume definidos, geralmente inerte, com dimensões, características e propriedades adequadas ao uso na engenharia civil.

Ainda segundo a NBR 7211 (ABNT, 2005), o agregado deve ser composto por grãos de minerais duros, compactos, estáveis, duráveis e limpos, e não devem conter substâncias deletérias.

Do ponto de vista geológico, Bauer (1995) define a areia como um sedimento clástico inconsolidado, de grãos em geral quartzosos, de diâmetro entre 0,06 e 2,00mm.

Em termos médios, uma areia apresenta massa unitária na ordem de 1.500 kg/m³ (BASÍLIO, 1995).

2.1.1.3 Sílica Ativa

Sílica ativa, fumo de sílica condensada, sílica volatilizada, microssílica ou simplesmente fumo de sílica são alguns nomes que esta adição mineral recebe, sendo sílica ativa o mais comum no meio técnico. Segundo o ACI 363 (1992) apud BACCIN (1998), a sílica ativa é um subproduto resultante da redução de quartzo de alta pureza com carvão, em fornos aquecidos eletricamente com circulação de ar, na produção de silício e ligas de ferro-

silício. A figura 2.3 ilustra uma amostra da sílica ativa fornecida pela empresa Tecnosil Sílica Ativa para os estudos.

Figura 2.3 - Sílica Ativa em pó



Fonte: Autor

De acordo com Mendes (2002), o desempenho da sílica ativa com relação às demais adições minerais se deve, principalmente, às suas características físico-químicas, que lhe conferem uma alta reatividade com os produtos de hidratação do cimento Portland, e proporcionam um melhor empacotamento das partículas de cimento. Por estas razões, entre as adições minerais, a sílica ativa é mais utilizada, atualmente, para a produção de concretos de alto desempenho.

Segundo Vieira et al. (1997), a adição da sílica ativa nos concretos de cimento Portland tem apresentado diversos benefícios às propriedades do concreto, tanto em relação à sua reologia no estado fresco e, principalmente, ao comportamento mecânico e de durabilidade no estado endurecido. A incorporação de sílica ativa promove uma diminuição da porosidade e torna a microestrutura do concreto mais denso e compacto, resultando em um material com desempenho superior ao concreto convencional, capaz de proteger o concreto contra os agentes agressivos. Por esta razão optou-se por adicionar a sílica ativa ao traço do compósito, permitindo assim um melhor travamento das fibras de polipropileno no compósito. Além disso, de acordo com Dal Molin et al. (1995), em função de suas propriedades químicas e físicas, a sílica ativa é considerada uma excelente pozolana, que, quando usada no concreto, além de atuar quimicamente também atua de forma física, através do efeito microfíler.

A NBR 13956 (1997) classifica a sílica ativa em três tipos: sílica ativa densificada, sílica ativa não densificada, e sílica ativa em forma de lama, conforme se segue:

- Sílica ativa densificada é um material submetido a beneficiamento por aglomeração das partículas, tendo como valores típicos de massa específica aparente, no estado solto, superiores a 350kg/m³.
- A Sílica ativa não densificada é um material obtido diretamente do filtro coletor, tendo como valores típicos de massa específica aparente, no estado solto, de 150kg/m³ a 350kg/m³.
- A sílica ativa também está disponível misturada diretamente no cimento Portland, na Islândia, no Canadá e na França, em teores entre 6,7% e 9,3% em relação à massa de cimento (AITCIN, 2000 apud ARAÚJO et al., 2006).

Segundo Aïtcin (2000), teoricamente, a dosagem ideal de sílica ativa necessária para fixar todo o potencial de cal liberada pela hidratação do C₃S e do C₂S, estaria entre 25 e 30%, o que seria inviável na prática pela elevada quantidade de superplastificante a ser acrescida na dosagem.

Geralmente é empregado na dosagem do concreto de alto desempenho de 5% a 15% de sílica ativa sobre a massa de cimento (ACI 363R-92, 2001 apud MENDES, 2002). De acordo com Neville (1997) apud Mendes (2002), teores abaixo de 5% não resultam em aumento de resistência, pois esta quantidade de adição é insuficiente para permitir o fortalecimento da interface agregado-pasta. Dosagens acima de 15% resultam em menores ganhos de resistência e aumentos consideráveis no custo final do concreto (GUTIERREZ e CÁNOVAS, 1996 apud MENDES, 2002). YOGENDRAN et al. (1987) apud MENDES (2002) encontraram, para concretos na faixa de 50 a 70MPa, o teor ótimo de 15%. Outros pesquisadores concordam que a incorporação de sílica ativa em substituição a 10% da massa de cimento, além de não prejudicar a trabalhabilidade de concretos com relação a/c baixas, otimiza o ganho de resistência (ALMEIDA, 1990; DOMONE e SOUTSOS, 1994; TAYLOR et al., 1996; DUVAL e KADRI, 1998 e AÏTCIN, 2000; apud MENDES, 2002).

2.1.1.4 Aditivo Superplastificante

Segundo Mehta e Monteiro (1994), uma das principais propriedades do concreto fresco é a trabalhabilidade, propriedade que determina o esforço necessário para manipular uma quantidade de concreto fresco com uma perda mínima de homogeneidade.

Os superplastificadores, também chamados de superfluidificantes são aditivos químicos que podem ser adicionados às misturas de concreto para fazê-las mais trabalháveis. A resistência final do concreto é inversamente proporcional à quantidade de água adicionada na mistura. Procura-se produzir um concreto mais forte e se adiciona menos água à mistura, o

que a torna menos trabalhável, sendo necessário o uso de plastificantes ou superplastificantes (CONCREMIX, 2015).

Normalmente, é suficiente adicionar cerca de 2% de superplastificante por unidade de massa de cimento. Não obstante, note-se que a maioria dos superplastificantes disponíveis no mercado vem dissolvida em água, de modo que a água contida no superplastificante deve ser considerada da dosagem. Adicionar demasiada quantidade de superplastificante pode resultar na segregação do concreto, algo não é aceitável. Alguns estudos demonstram que demasiado superplastificante pode aumentar o tempo de cura do concreto, (W.R.Grace, 2015).

Os superplastificantes geralmente procedem de naftaleno formaldeído sulfonado ou de melamina formaldeído sulfonado, e existe uma nova geração de superplastificantes desenvolvidos a partir de éteres policarboxílicos. Os plastificantes tradicionais à base de lignosulfatos e os superplastificantes à base de naftaleno e melamina dispersam as partículas de cimento floculadas mediante um mecanismo de repulsão eletrostática. Nos plastificantes normais, as substâncias ativas são adsorvidas sobre as partículas de cimento carregando-as negativamente, o que provoca a repulsão entre elas ao ter cargas do mesmo sinal. Nos superplastificantes de naftaleno e de melamina, que são polímeros orgânicos, as moléculas grandes "abraçam" as partículas de cimento, dando-lhes uma carga altamente negativa, que provoca uma grande repulsão entre elas (DIPROTEC, 2015).

Os éteres policarboxílicos, base da nova geração de superplastificantes, não são só quimicamente diferentes dos produtos baseados em melamina e naftaleno sulfonados. Seu mecanismo de ação é também diferente, pois provoca a dispersão do cimento por estabilização estérica em lugar de repulsão eletrostática. Esta forma de dispersão é mais potente e melhora a mistura. Ademais, a estrutura química dos éteres policarboxílicos permite um maior grau de modificação química, podendo assim adaptar a mistura às necessidades do trabalho específico a realizar (W.R.Grace, 2015).

A NBR 11768 (2011) define os aditivos redutores de água ou superplastificantes como aditivo que, sem modificar a consistência do concreto no estado fresco, permite uma elevadíssima redução no conteúdo de água de um concreto, ou que, sem alterar a quantidade de água, aumenta consideravelmente o abatimento e a fluidez do concreto, ou ainda, aditivo que produz esses dois efeitos simultaneamente. Nesta classificação, o aditivo não apresenta função secundária sobre a pega.

2.1.1.5 *Fibras de polipropileno*

Segundo Garcez (2009), as fibras, quando adicionadas ao concreto, reduzem as fissuras causadas pela retração e assentamento plástico; aumentam a resistência ao fogo, permitem controle da exsudação e segregação, propiciam maior resistência ao impacto e melhoram a resistência ao desgaste.

As fibras de polipropileno, popularmente conhecidas como fibras PP, são compostas por filamentos extremamente finos, produzidos por meio de processo de extrusão. Seu uso é indicado em concretos e argamassas, pois, reduzem o índice de fissuras provocadas pela retração e assentamento, devido a sua capacidade de retenção de água no interior desses. Além disso, propiciam um controle sobre os fenômenos de exsudação e segregação (MACCAFERRI, 2014).

Segundo Figueiredo (2005), as fibras que possuem módulo de elasticidade inferior ao do concreto endurecido, como as de polipropileno e náilon, são tradicionalmente chamadas de fibras de baixo módulo. Já as fibras que possuem módulo de elasticidade superior ao do concreto são conhecidas como fibras de alto módulo.

As fibras de polipropileno têm sido extensivamente empregadas no campo de prevenção de fissuras, tendo sido comprovada sua eficiência no aumento da resistência à retração plástica de concretos e argamassas (GARCEZ et al., 2009).

Segundo Garcez (2009), as fibras convencionais de polipropileno, no entanto, não podem ser empregadas como reforço único de concretos e argamassas, devido a algumas de suas propriedades, principalmente relacionadas à fraca aderência química e de contato a matrizes cimentícias. Há disponível no mercado fibras de polipropileno com propriedades físicas e químicas modificadas, chamadas fibras de polipropileno de alta tenacidade.

As fibras de polipropileno de alta tenacidade são capazes de promover um reforço mais efetivo de compostos cimentícios, quando comparados a reforços com fibras de polipropileno convencionais, além de apresentarem equivalente durabilidade, compatibilidade com bases cimentícias, boa processabilidade e custo acessível. (GARCEZ et al., 2009).

2.1.1.6 *Tipos e propriedades das fibras*

Segundo Al-Tamini (2001), existem três tipos principais de fibras que podem ser usadas como reforço da matriz cimentícia. São elas:

- Fibras metálicas: usualmente de aço;
- Fibras minerais: o vidro é o mais comum;

- Fibras poliméricas: incluindo o carbono, nylon, polipropileno e poliéster.

A escolha pelo tipo de fibra a ser usada depende das características do material que se deseja obter.

A escolha das fibras de polipropileno para esta pesquisa levou em conta o custo do produto e sua aquisição no mercado nacional. As referidas fibras de polipropileno, além de serem produzidas e distribuídas no território nacional, tem custo relativamente inferior ao das demais fibras. As fibras de polietileno são ainda mais caras, custando cerca de oito vezes o custo das fibras de PVA (LI et al., 2001). Assim, optou-se pelas fibras de polipropileno de alta tenacidade.

2.2 COMPORTAMENTO MECÂNICO DAS FIBRAS DE POLIPROPILENO

Segundo Salvador (2013), as propriedades mecânicas de materiais poliméricos são especificadas pelos mesmos parâmetros utilizados para metais, como módulo de elasticidade, limite de escoamento e resistência à tração. Para a maioria dos polímeros, a caracterização do comportamento mecânico é realizada pelo ensaio de tração, obtendo-se uma curva de tensão-deformação (CALLISTER, 2002).

As aplicações dos polímeros são definidas de acordo com seu comportamento mecânico, uma função de sua microestrutura e morfologia.

De acordo com Barcellos (2012), as fibras de polipropileno foram introduzidas comercialmente no mercado em 1957. Trata-se de uma resina que apresenta o segundo maior volume de produção em escala mundial, sendo produzido a partir do refino do petróleo com aplicação de catalisadores de Ziegler-Natta¹.

Suas propriedades de interesse são: baixo custo, facilidade de processamento, excelente resistência química, resistência mecânica e rigidez moderadas, boa ductilidade e ótima resistência à fadiga. Suas aplicações mais comuns são a produção de fibras, filmes orientados, utensílios domésticos e peças automotivas (EBEWELE, 1996; MARK, 1999).

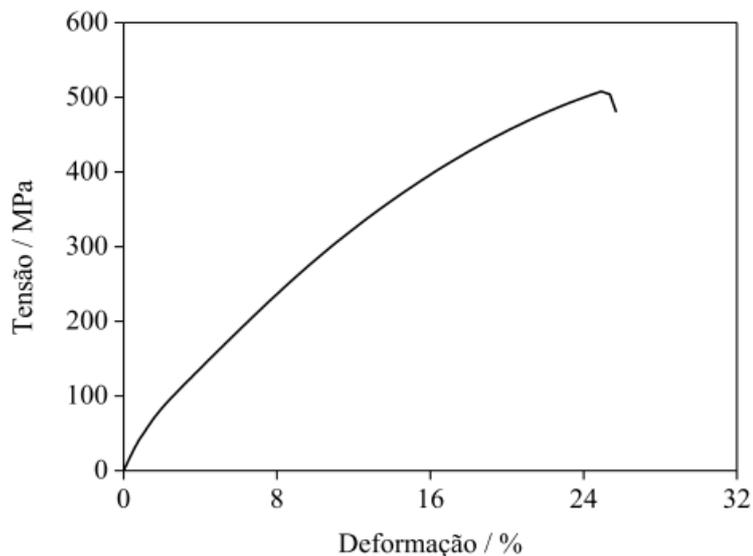
O polipropileno é um polímero hidrofóbico, sendo necessária a modificação de sua superfície para que seja apto à utilização em fibras poliméricas (SALVADOR, 2012).

Ainda conforme Salvador (2012), a Figura 2.4 apresenta a curva de tensão-deformação de um fio de polipropileno, produzido a partir da extrusão do homopolímero PP H604

¹ Um catalisador Ziegler-Natta é um reagente usado na produção de polímeros vinílicos estereoregulares não ramificados. Catalisadores Ziegler-Natta são tipicamente baseados em cloretos de titânio e compostos organometálicos de alquil alumínio e usados para polimerizar 1-alcenos terminais.

(fornecido pela Braskem), em extrusora de rosca simples e estirado na taxa de 8 vezes, à temperatura de 95°C. Pode ser observado que o fio apresenta ductilidade e deformação de, aproximadamente, 26% até sua ruptura.

Figura 2.4 - Curva tensão-deformação de um fio de polipropileno



Fonte: Salvador, 2012

2.2.1 Tenacidade

Denomina-se tenacidade a capacidade que o material possui de absorver energia total (elástica e plástica) por unidade de volume até atingir a ruptura (fratura). O material capaz de absorver uma quantidade elevada de energia nesse regime é dito tenaz. É o oposto do material frágil, no qual se tem a fratura com pequena absorção de energia, como por exemplo, os materiais cerâmicos, que têm baixa tenacidade.

Fatores importantes para definir esta propriedade são a forma geométrica do corpo de prova, bem como a maneira como a carga é aplicada. Para situações nas quais o processo é estático, a tenacidade pode ser avaliada a partir dos resultados de um ensaio tração-deformação em tração.

2.2.1.1 Tenacidade dos materiais

No âmbito da Física, a tenacidade (cuja unidade é J/m^3) consiste em uma propriedade mecânica dos metais, de absorção de energia, que indica a sua resistência, quando lhe é aplicada uma força de tração, podendo levar à deformação ou até à ruptura. Nos objetos com elevada tenacidade, as moléculas apresentam grande coesão entre elas.

Trata-se de uma propriedade mecânica como a ductilidade (capacidade de alguns materiais de sofrerem deformação sem se romperem) e a resiliência (capacidade de absorver energia mecânica, quando submetido a situações de estresse, como rupturas).

Em alguns objetos como placas de concreto, por exemplo, são introduzidas barras metálicas com o objetivo de aumentar a sua tenacidade.

2.2.2 Ductilidade

Ductilidade é a qualidade ou propriedade do que é dúctil, ou seja, do que é flexível, elástico, maleável, que se pode comprimir ou reduzir a fios sem se quebrar. Que se pode distender sem romper.

Ductilidade é a capacidade que alguns materiais possuem de se deformarem antes da ruptura, quando sujeitos a tensões muito elevadas. Quanto mais dúctil o aço, maior é a redução de área ou alongamento antes da ruptura. A ductilidade pode ser medida a partir da deformação ou da estrição. Este comportamento fornece avisos, ocorrências de tensões elevadas em pontos da estrutura.

Na fase de escoamento, situação em que o corpo se deforma sem o acréscimo de tensão, ocorre uma redistribuição das tensões na estrutura.

2.2.2.1 Ductilidade dos materiais

A ductilidade é uma das diversas propriedades mecânicas dos metais que lhe confere a qualidade de suportar a maleabilidade a ponto de se deformar sem se romper. É a capacidade de ser deformado, esticado e dobrado, sem rachar e sem perder sua resistência. Ex.: ouro, prata, cobre, etc.

Além da ductilidade, os metais apresentam também a propriedade mecânica da tenacidade, ou seja, a resistência que possuem quando são submetidos à força de tração, podendo levar da deformação até a ruptura. É a quantidade de energia que um material pode absorver antes de romper-se.

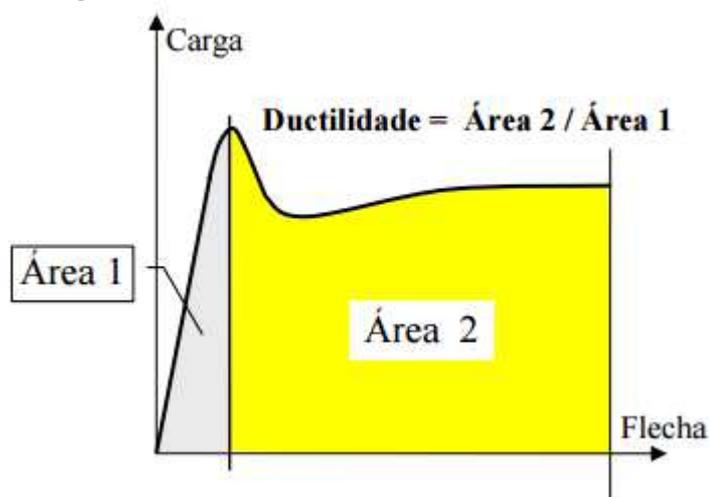
2.2.3 Caracterização da ductilidade no CRF

Segundo Thomaz (2009), não há, no entanto, um método inequívoco para medir essa mudança de comportamento. A maioria dos pesquisadores tentou comparar diferentes CRF em termos da ductilidade, isto é, em termos da área sob a curva “Carga x Flecha”. Não há

uma concordância em como medir esse aumento de ductilidade produzido pelas fibras. Estas divergências estão nas abordagens adotadas, sendo:

- Uma medida absoluta da ductilidade é a energia requerida para deformar um corpo de prova, de uma geometria específica, até uma deflexão específica, medindo a área sob a curva “Carga X Flecha”. O resultado desses ensaios depende inteiramente do tamanho do corpo de prova e da flecha especificada. Um ensaio desse tipo é o especificado pelo Japan Concrete Institute.
- Uma medida relativa da ductilidade pode ser definida em termos da área sob a curva “Carga X Flecha” em diversos pontos, com deformações múltiplas da deformação da primeira fissura. A razão dessa área em relação à área sob a curva, até o ponto da primeira fissura, é uma medida da ductilidade, conforme apresentado na figura 2.5.

Figura 2.5 - Método de cálculo de ductilidade



Fonte: Thomaz, 2009

Esses dois métodos são muito sensíveis ao modo como as deflexões são medidas. Deve-se usar um sistema que elimine deflexões devidas à deformação da máquina de ensaio e dos suportes do corpo de prova (deformações parasitas). Além disso, ao usar a norma ASTM C1018, é muito difícil definir, sem erro, o ponto da primeira fissura, pois isso depende da sensibilidade do sistema de aquisição de dados. Existe, por esse motivo, uma grande dispersão de resultados. Muitas vezes não se consegue distinguir, por meio do ensaio, entre diferentes fibras ou entre diferentes teores de fibras. Isso ocorre para baixos volumes de fibra, que são os mais usados.

Um dos ensaios mais promissores na atualidade é o do RILEM TC162 (2002), adotado neste trabalho.

2.3 MÉTODO RILEM-TC 162-TDF (2002)

A determinação da ductilidade do CDRF foi feita seguindo as recomendações prescritas pela RILEM TC 162-TDF (2002). Esta norma se destaca na caracterização de ensaios de materiais compósitos com fibras, estabelecendo parâmetros para análise e dimensionamento de estrutura de concreto reforçada com fibras. Optou-se por esse ensaio por ser de fácil realização, fornecer resultados satisfatórios e pelo respeito no âmbito mundial que a entidade recebe.

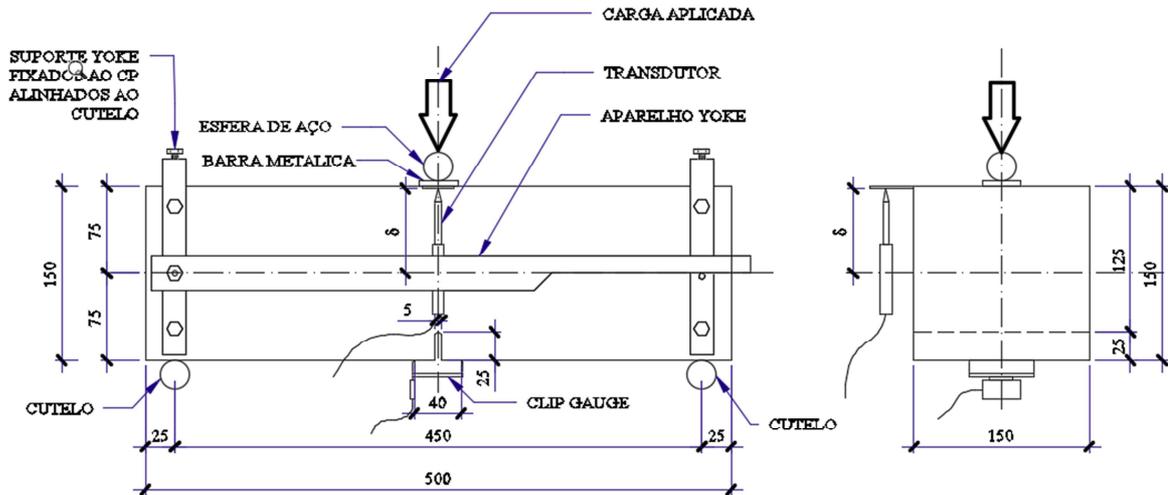
O método da RILEM TC 162-TDF (2002) avalia o comportamento do concreto pelo ensaio à flexão em três pontos, realizado em viga entalhada no sentido transversal, no meio de seu comprimento.

Pela RILEM os critérios de avaliação da tenacidade são baseados na capacidade de absorção de energia e são definidos pela área sob a curva do gráfico força x deslocamento vertical ($P-\delta$), onde P é a força aplicada ao corpo de prova e o δ é o seu deslocamento vertical. A contribuição das fibras para a tenacidade do compósito é avaliada por meio da subtração da parcela de tenacidade que provém da matriz cimentícia.

Com base nos gráficos força x deslocamento vertical ou força x abertura da fissura obtidos durante o ensaio, obteve-se o limite de proporcionalidade e mais quatro parâmetros, designados de resistências equivalentes e resistências residuais em flexão determinados em pontos específicos. Mesmo adquirindo cinco índices, a RILEM TC 162-TDF (2002) classifica o concreto reforçado com fibras de aço com base em apenas dois deles, que são as forças de flexão residual.

A figura 2.6 apresenta a configuração do ensaio. Como se pode ver, a fixação do transdutor para medir o deslocamento vertical foi posicionada no aparelho YOKE e o clip gauge fixado junto ao entalhe para medir a abertura de fissura (CMOD).

Figura 2.6- Configuração geral do ensaio



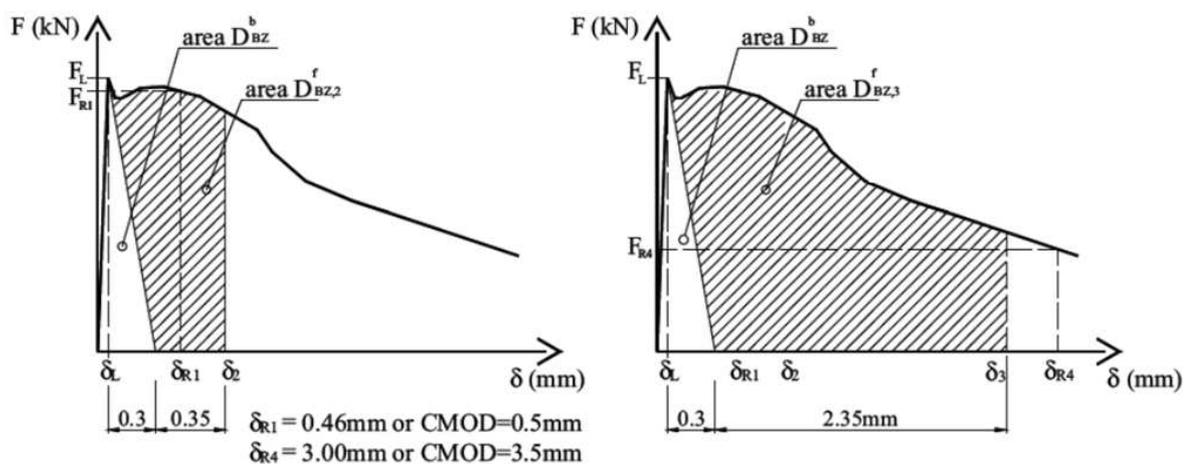
Fonte: Autor

2.3.1 Forças e resistências

A RILEM TC 162-TDF (2003) classifica o concreto reforçado com fibras de aço usando dois parâmetros, $F_{L0,5}$ e $F_{L3,5}$, que são determinados pelas forças de flexão residual $f_{R,1}$ e $f_{R,4}$, respectivamente. As forças são calculadas em pontos específicos de deformação ($\delta_{R,i}$) ou de abertura da fissura (CMOD_i), como será apresentado a seguir pelas equações apresentadas.

A Figura 2.7 apresenta uma típica resposta do comportamento à flexão do compósito com fibra, conforme apresentado pela RILEM TC 162-TDF.

Figura 2.7 - Critérios da RILEM para avaliação do comportamento de materiais com fibras



Fonte: Ferrari (2007)

A capacidade de absorção de energia ($D_{BZ,2}$ e $D_{BZ,3}$) do compósito pode ser dividida em duas partes: uma referente à matriz cimentícia (D_{BZ}^b) e outra referente às fibras ($D_{BZ,2}^f$ e $D_{BZ,3}^f$). Esta última parcela é calculada pela área abaixo da curva força x deslocamento até as deformações pré-determinadas δ_2 e δ_3 , descontada a área referente à matriz cimentícia.

As expressões utilizadas para cálculo das resistências equivalentes à tração na flexão ($f_{eq,2}$ e $f_{eq,3}$) e das resistências residuais em flexão (f_{R1} e f_{R4}), são apresentadas a seguir nas equações 4.1, 4.2, 4.3e 4.4, juntamente com os significados dos parâmetros, considerando de acordo com a RILEM TC 162-TDF, uma distribuição linear de tensões na seção de fratura e desprezando a parcela de energia absorvida pela matriz cimentícia:

$$f_{eq,2} = \frac{3}{2} \cdot \frac{D_{BZ,2}^f}{0,5} \cdot \frac{L}{b \cdot h_{sp}^2} \quad (4.1)$$

$$f_{eq,3} = \frac{3}{2} \cdot \frac{D_{BZ,3}^f}{2,5} \cdot \frac{L}{b \cdot h_{sp}^2} \quad (4.2)$$

$$f_{R,1} = \frac{3}{2} \cdot \frac{F_{R,1} \cdot L}{b \cdot h_{sp}^2} \quad (4.3)$$

$$f_{R,4} = \frac{3}{2} \cdot \frac{F_{R,4} \cdot L}{b \cdot h_{sp}^2} \quad (4.4)$$

F_L - é a força máxima de *offset* dentro do intervalo de $\delta=0,05$ mm. Esse intervalo é obtido com o auxílio de uma reta paralela à tangente inicial, passando pelo ponto que caracteriza o deslocamento δ de *offset*. A versão mais atual permite tomar simplificada, F_L , como sendo o maior valor de força registrado no intervalo de $\delta=0,05$ mm e com isso, é possível calcular a resistência à tração na flexão ou tensão no limite de proporcionalidade (Equação 4.5), onde:

δ_L - é o valor de deslocamento vertical correspondente a F_L ;

$f_{fct,L}$ - é a tensão correspondente à força F_L , dado pela expressão:

$$f_{fct,L} = \frac{3 \cdot F_L \cdot L}{2 \cdot b \cdot h_{sp}^2} \quad (4.5)$$

L - vão livre do corpo-de-prova;

b - largura;

h_{sp} - distância do topo do entalhe até a face superior do corpo-de-prova;

D_{BZ}^b , $D_{BZ,2}^f$ e $D_{BZ,3}^f$ – parcelas de absorção de energia pela matriz e pelas fibras, respectivamente. São calculadas através da área sob a curva P- δ até deslocamentos específicos (ver Figura 2.6);

$F_{R,1}$ e $F_{R,4}$ – valores de força correspondentes aos deslocamentos $\delta_{R1}=0,46$ mm e $\delta_{R4}=3,00$ mm. São valores utilizados para cálculo das resistências residuais dos compósitos.

A linha que divide a influência da matriz, da influência das fibras, pode ser simplificada por uma reta cujo ponto inicial é o valor de FL e ponto final o valor de deslocamento correspondente à $\delta L + 0,3$ mm, onde δL corresponde ao deslocamento do limite de proporcionalidade (Figura 3.5). A partir desse ponto, define-se também, os valores pré-determinados de $\delta 2$ e $\delta 3$ (Equações 4.6 e 4.7):

$$\delta_2 = \delta_L + 0,65 \text{ (mm)} \quad (4.6)$$

$$\delta_3 = \delta_L + 2,65 \text{ (mm)} \quad (4.7)$$

Também pode-se calcular as tensões residuais adotando a equação 4.8.

$$f_{R,i} = \frac{3}{2} \cdot \frac{F_{R,i} \cdot L}{b \cdot h_{sp}^2} \quad (4.8)$$

$$CMOD1 = 0,5 \text{ mm} - \delta_{R,1} = 0,46 \text{ mm}$$

$$CMOD2 = 1,5 \text{ mm} - \delta_{R,2} = 1,31 \text{ mm}$$

$$CMOD3 = 2,5 \text{ mm} - \delta_{R,3} = 2,15 \text{ mm}$$

$$CMOD4 = 3,5 \text{ mm} - \delta_{R,4} = 3,00 \text{ mm}$$

Onde:

$f_{r,i}$ = tensão de flexão residual no ponto i (N/mm^2);

$F_{R,i}$ = carga registrada no ponto de $CMOD_i$ ou $\delta_{R,i}$ (N);

L = comprimento do corpo de prova (mm);

b = largura do corpo de prova (mm);

h_{sp} = distância entre a ponta da fissura e a face superior do corpo de prova (mm).

Com as tensões de flexão residual $f_{R,1}$ e $f_{R,4}$, são determinados os parâmetros $F_{L0,5}$ e $F_{L3,5}$, respectivamente, como exposto. Os valores de $F_{L0,5}$ e $F_{L3,5}$, que coincidem com os valores de $f_{R,1}$ e $f_{R,4}$, devem ser reduzidos em múltiplos de 0,5 MPa e devem variar entre 1 e 6 MPa e 0 e 4 MPa, respectivamente. Com isso, a classe de resistência residual é representada por $F_L F_{L0,5}/F_{L3,5}$ com seus correspondentes valores.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

3.1.1 Cimento CP-V ARI

Para esta pesquisa foi utilizado o cimento produzido pela empresa Cimentos Itambé, a qual fez a doação do produto e forneceu suas características pós fabricação.

A massa específica média do CP-V-ARI ITAMBÉ é $3,09 \text{ g/cm}^3$ (NBR NM 23). Nos Quadros 3.1 e 3.2 tem-se as características do cimento produzido e fornecido pela empresa para realização dos experimentos, em evidência a data de fabricação dos produtos em 15 de setembro de 2015 e, no Quadro 3.3, apresenta-se a resistência à compressão do cimento CP-V definida pela ABNT, para comparativo com o produto utilizado.

Quadro 3.1 - Características químicas do cimento CP V-ARI

Data	Químicos									
	Al ₂ O ₃	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	Perda Fogo	CaO Livre	Resid. Insol.	Equiv. Acal.
	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%
15/09	4,28	19,20	2,74	61,29	4,44	2,95	3,27	0,98	0,73	0,66

Fonte: <http://www.cimentoitambe.com.br/relatorios-de-ensaio/?pro=371&chave=2015-9> (2015)

Quadro 3.2 - Características físicas do cimento CP V-ARI

Data	Físicas										
	Exp. Quente	Tempo de pega		Cons. Norma 1	Blaine	#200	#325	Resistência à compressão			
	Mm	h:min	h:min	%	cm ² /g	%	%	1 dia	3 dia	7 dia	28 dia
15/09	0,00	03:10	04:00	28,8	4,000	0,040	1,10	20,4	36,6	43,1	51,7

Fonte: <http://www.cimentoitambe.com.br/relatorios-de-ensaio/?pro=371&chave=2015-9> (2015)

Quadro 3.3 - Resistência característica para CP-V, segundo ABNT

1 dia	$\geq 14,0 \text{ Mpa}$
3 dias	$\geq 24,0 \text{ Mpa}$
7 dias	$\geq 34,0 \text{ Mpa}$

3.1.2 Areia natural

A areia natural foi retirada do Rio Paraná pelo processo de dragagem pela empresa mineradora. Pode-se classificar a areia utilizada, segundo a NBR 7211 (2005), como média, de acordo com o ensaio granulométrico realizado. A Figura 3.1 mostra uma parcela da areia a ser utilizada na pesquisa, sendo esta passada pelo processo secagem e peneiramento para se obter o módulo de finura e sua curva granulométrica.

Figura 3.1 - Areia média do rio Paraná



Fonte: Autor

O quadro 3.4 mostra a massa específica do agregado, conforme ensaio descrito na NBR NM 52 (2009) e realizado em laboratório para caracterização da mesma.

Quadro 3.4 - Determinação da massa específica da areia

ENSAIO N.º	FRASCO N.º	MASSA DE AREIA SECA (M ₁) (g)	MASSA DO CONJUNTO		MASSA ESPECIFICA APARENTE DO AGREGADO SECO (kg/dm ³)
			FRASCO + ÁGUA (M ₂) (g)	FRASCO + AREIA+ ÁGUA (M ₃) (g)	
1	7	504,13	915,14	1229,69	2,659
2	7	500,00	915,14	1224,47	2,622
3	7	500,71	915,14	1228,50	2,673
<i>VALORES MÉDIOS</i>					2,651
OBSERVAÇÕES:				$Y_S = \frac{M_1}{M_2 - (M_3 - M_1)} * Y_{ÁGUA}$	
1) MASSA ESPECIFICA DO AGREGADO SECO: 2,651 kg/dm ³					

Fonte: Autor

No Quadro 3.5, são apresentados os resultados do ensaio granulométrico realizado para caracterização da areia, bem como a sua curva granulométrica a partir da NBR NM 248 (2003).

Quadro 3.5 - Ensaio granulométrico para caracterização da areia

PENEIRAS (mm)	ENSAIO 1			ENSAIO 2			PORCENTAGEM MÉDIA DO MATERIAL RETIDO E ACUMULADO (%)
	MASSA DE MATERIA L RETIDO (g)	PORCENTAGEM DE MATERIAL		MASSA DE MATERIAL RETIDO (g)	PORCENTAGEM DE MATERIAL		
		RETIDO (%)	RETIDO E ACUMULADO (%)		RETIDO (%)	RETIDO E ACUMULADO (%)	
6,3							
4,8	0,00	0,0	0,0	,00	0,0	0,0	0
2,4	2,96	0,6	0,6	2,93	0,6	0,6	1
1,2	5,25	1,1	1,6	5,22	1,0	1,6	2
0,6	35,73	7,2	8,8	35,78	7,2	8,8	9
0,3	325,92	65,3	74,1	325,95	65,2	74,0	74
0,15	120,,17	24,1	98,2	120,12	24,0	98,0	98
FUNDOS	9,07	1,8	100,0	10,00	2,0	100,0	100
TOTAL (g)	499,10			500,00	Módulo de finura = 1,840		
MASSA INICIAL DA AMOSTRA = 499,34/500,00				Dimensão Máxima Característica = 1,2mm			
<p>POCENTAGEM RETIDA E ACUMULADA</p> <p>POCENTAGEM QUE PASSA ACUMULADA</p> <p>PENEIRAS (mm)</p>							

Fonte: Autor

3.1.3 Sílica Ativa

Para este trabalho foi utilizada a sílica ativa não densificada da empresa Tecnosil Sílica Ativa, que forneceu o produto para a pesquisa. No quadro 3.6, pode-se ver os valores de referência das características física e químicas da sílica ativa.

Quadro 3.6 - Características Físicas e Químicas da Sílica Ativa Tecnosil

Características	Valor	Unidade	Limite Inferior	Limite superior
Equivalência Alcalino em Na ₂ O	0,8	%		
% SiO ₂	95	%	85%	
Umidade	0,5	%		3,0
Perda ao fogo	1,8	%		6,0
% Retido 45µm (325 MESH)	0,7	%		10
Densidade	0,40	g/cm ³	0,20	1,00
Ph	7,9			
Na ₂ O	0,2	%		
Fe ₂ O ₃	0,1	%		
CaO	0,4	%		
Al ₂ O ₃	0,2	%		
MgO	07	%		
K ₂ O	1,0	%		

Fonte: Tecnosil (2015)

3.1.4 Fibras de Polipropileno

As fibras de polipropileno utilizadas neste trabalho foram produzidas e fornecidas pela empresa BRASILIT Saint-Gobain. A Figura 3.2 traz uma amostra da fibra PP fornecida. Foram adotadas fibras de 10 mm de comprimento. Optou por utilizar as fibras de polipropileno por serem as mesmas utilizadas por Li e Garcez em suas pesquisas com ECC.

Quanto ao comprimento da fibra, pensou-se na compatibilidade dimensional com agregados graúdos. A relação entre o comprimento da fibra e o comprimento característico dos agregados deve ser a seguinte: $L_{\text{fibra}} > 2L_{\text{agregado}}$. Essa compatibilidade é determinada uma vez que com as referidas dimensões, proporciona-se ganhos significativos

na interceptação das fissuras, que geralmente ocorrem na interface entre argamassa e o agregado (figuras 2 e 3).

Figura 3.2 - Fibra de Polipropileno de alta tenacidade



Fonte: Autor

Descrição do produto segundo a empresa BRASILIT, que forneceu o produto para a pesquisa: “Filamentos de polipropileno picados (PP) são obtidos por processo de fiação de uma resina de polipropileno seguindo por um processo de estiramento controlado para alcançar propriedades físicas e mecânicas desejáveis. Os filamentos são cobertos por uma fina camada de rotação acabamento que dá uma dispersão adequada de filamentos em água e uma excelente aderência ao cimento”.

O Quadro 3.7 apresenta as características físicas da fibra de polipropileno de alta tenacidade utilizadas para esse estudo.

Quadro 3.7 - Características da fibra de polipropileno

	Especificação	Valores típicos
Comprimento	10 mm	
Diâmetro médio de filamentos picados (dtex)	1,0 a 1,3	1,2 dtex (~12,5 µm)
Densidade (g/cm ³)		~ 0,905
Tenacidade (cN/dtex)	Min. 8,5	9 a 11
Alongamento à ruptura (%)	Max. 25	10 a 22
Umidade (%)	Max. 2,5	1,5

Fonte: Brasilit (2015)

3.1.5 Aditivo Superplastificante

Com o intuito de proporcionar trabalhabilidade às misturas e facilitar a dispersão das fibras, sem que fosse necessário elevar a relação água-material cimentício, foi utilizado o

aditivo superplastificante Rheoset Tecflow 9030, de base policarboxílica, produzido pela empresa W.R. Grace. TEC FLOW é uma linha de aditivos superplastificantes para concreto com alto poder de redução de água, com aplicações múltiplas e isento de cloretos. Suas características são apresentadas no Quadro 3.8. A figura 3.3 apresenta uma amostra do produto utilizado na pesquisa.

Quadro 3.8 - Característica do aditivo superplastificante

Produto	Descrição do Produto	Aspecto/Cor	*Dosagem Recomendada (% SPC)	Massa Específica g/cm ³ (NBR 10908)
Tec-Flow 9030	Concreto em geral, fluido ou auto-adensável. Proporciona excelente redução da demanda de água, ótima manutenção de abatimento e ótimas resistências iniciais e finais.	Líquido alaranjado	0,6 a 2,0%	1,050 - 1,090

Fonte: Grace (2015)

Figura 3.3 - Aditivo superplastificante de base policarboxílica



Fonte: Autor

3.1.6 Água

Para o amassamento foi utilizada água potável disponível na rede local de abastecimento.

3.2 MÉTODOS DOS ENSAIOS

3.2.1 Compatibilidade do Cimento CP V-ARI e o Aditivo Superplastificante

O uso de aditivos superplastificantes permite o aumento da trabalhabilidade do concreto através da melhor distribuição das partículas de cimento. A compatibilidade entre o

cimento Portland e o aditivo superplastificante, representa uma única dosagem que resulta na obtenção de uma trabalhabilidade elevada por um período de tempo suficientemente longo.

Segundo o manual do fabricante Vedacit (2005), os superplastificantes a base de policarboxílicos possibilitam aos concretos com sílica uma significativa diminuição da permeabilidade com grande poder de aderência, coesão e isentos de segregação e exsudação. Além disso, devido à baixa porosidade, o concreto apresenta alta durabilidade.

Segundo Bispo (2009), quando ocorre uma dosagem excessiva do superplastificante na mistura, esta apresenta efeitos como a excessiva incorporação de ar, aumentando a porosidade do concreto, o que acarretará problemas como diminuição da durabilidade e resistência do concreto no estado endurecido.

Segundo Aïtcin (2000), não é possível determinar se um cimento e um superplastificante são compatíveis apenas pela especificação dos mesmos. É impossível mensurar o comportamento reológico com baixa relação a/c; Há a necessidade de testá-los e ver como funcionam. Diversos métodos foram desenvolvidos, envolvendo pequenas quantidades de materiais e fáceis de serem implementados e repetidos.

Para avaliar a compatibilidade entre o cimento Portland CP V-ARI e o aditivo superplastificante, foi adotado o método do Funil Marsh. O objetivo deste ensaio é determinar o ponto de saturação, que especifica a dosagem ótima do superplastificante que deve ser usado para o tipo de cimento utilizado nessa pesquisa.

Busca-se, assim, avaliar a compatibilidade entre os dois materiais, a dosagem necessária para garantir trabalhabilidade ao concreto fresco, sendo que uma dosagem excessiva pode causar segregação da mistura.

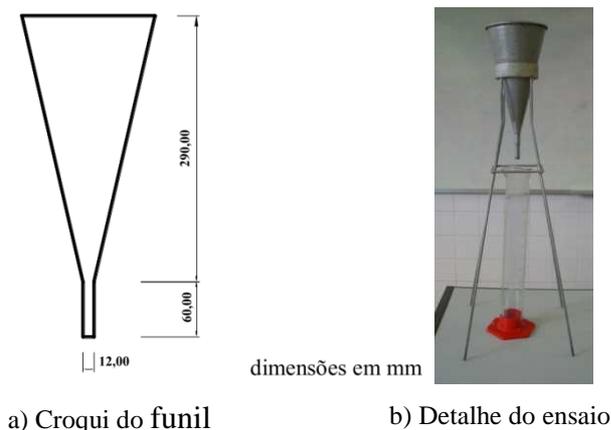
3.2.1.1 Método Funil Marsh

O método Funil Marsh tem sido usado em vários setores da indústria para avaliar a materiais que apresentam alto grau de fluidez, tais como, lamas de perfuração em poços de petróleo e caldas de injeção.

Segundo Monte e Figueredo (2004), a simplicidade e rapidez do método do funil de Marsh são suas principais vantagens. O funil Marsh é comumente utilizado na avaliação da compatibilidade entre o cimento e o aditivo superplastificante.

A Figura 3.4 apresenta o aparato de ensaio que consiste em um funil de metal e suas dimensões:

Figura 3.4 - Equipamento utilizado para o ensaio de Funil de Marsh



Fonte: Autor

3.2.1.2 Determinação da dosagem ótima de *sp/c* para cada faixa de *sc/c*

Neste ensaio foi adotado o método de Aïtcin (2000) para determinação do ponto de saturação do aditivo superplastificante. Esse estudo foi realizado com a pasta de cimento CP V-ARI e sílica ativa com aditivos superplastificantes. Deste modo, foi possível avaliar a pasta de cimento por meio de uma metodologia de ensaio que determina o tempo de escoamento pelo funil de Marsh. A descrição do procedimento consta no Apêndice A.

É importante avaliar o ponto de saturação para ter conhecimento do teor ideal de aditivo a ser aplicado na mistura, que propicie maior fluidez sem desperdício de aditivo, garantindo um ótimo desempenho.

3.2.2 Ensaio de compressão em corpos-de-prova cilíndricos

Para avaliar a resistência à compressão dos compósitos, foram moldados 02 corpos de prova cilíndricos de dimensões $\text{Ø}5 \times 10$ cm. A moldagem dos corpos de prova foi realizada conforme a ABNT NBR 7215:1997, sendo esta adaptada para a pesquisa. Após a moldagem, os corpos de prova foram curados por imersão em água durante 28 dias, e ensaiados à compressão axial conforme ABNT NBR 5739:2007. A Figura 3.5 apresenta a configuração para o ensaio de compressão do corpo de prova cilíndrico.

Figura 3.5 - Ensaio de compressão



Fonte: Autor

3.2.3 Ensaio do módulo de elasticidade em corpos-de-prova cilíndricos

Para o módulo de elasticidade longitudinal, foram moldados 03 corpos de prova cilíndricos de dimensões $\text{Ø}5 \times 10$ cm, conforme recomenda a ABNT NBR 7215:1997, curados por imersão em água durante 28 dias e ensaiados à compressão axial, conforme ABNT NBR 8522:2008. A Figura 3.6 apresenta a configuração para o ensaio de módulo de elasticidade nos copos de prova cilíndricos.

Figura 3.6 - Ensaio do módulo de elasticidade



Fonte: Autor

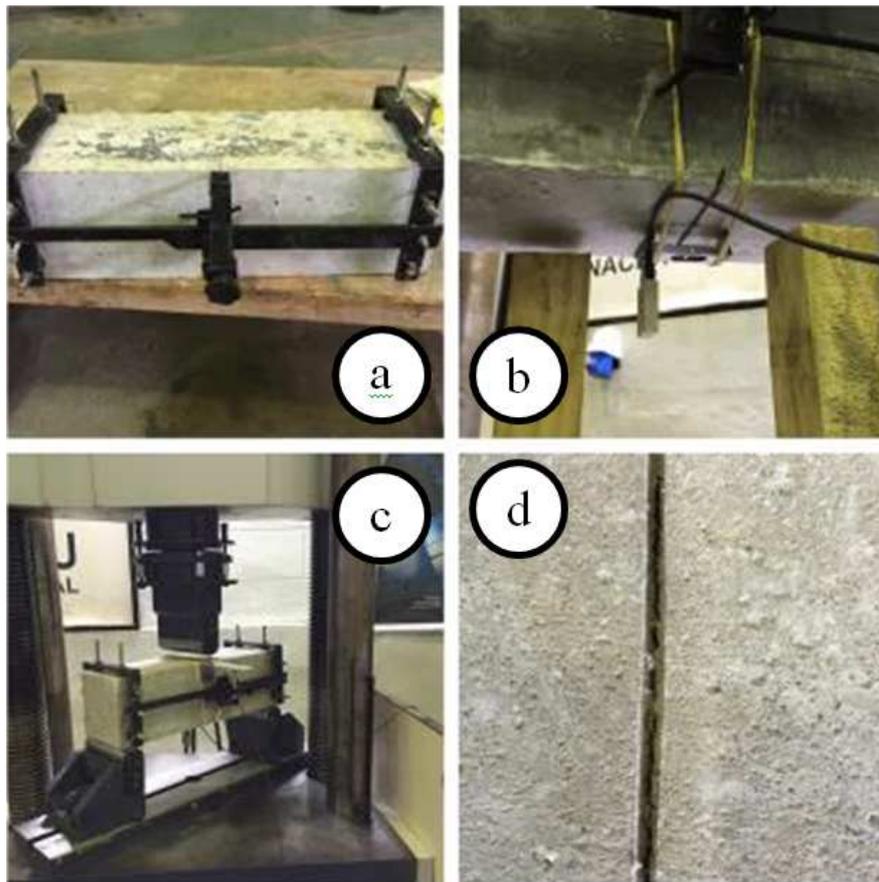
3.2.4 Ensaio de flexão em corpos-de-prova entalhados

Para avaliar o comportamento à tração na flexão do CDRF, realizaram-se ensaios de flexão em três pontos nos corpos-de-prova prismáticos entalhados ($15\text{cm} \times 15\text{cm} \times 50\text{cm}$).

Foram seguidas as recomendações da RILEM TC 162-TDF (2002) para realização dos ensaios, os quais foram feitos sob controle do CMOD (deslocamento de abertura da entrada do entalhe) no Laboratório de Tecnologia do Concreto da Usina Hidrelétrica de Itaipu, utilizando-se um equipamento servo-controlado, o TIMEGROUP com célula de carga e capacidade de 1000kN.

Para o ensaio, os corpos-de-prova receberam um entalhe central reto passante, com profundidade nominal de 5 mm e largura de 2 mm, conforme apresentado na Figura 3.7, de forma a induzir o fraturamento em um plano preferencial. Para medição dos deslocamentos e controle de deformação foi utilizado um transdutor de deslocamentos apoiado num suporte denominado “Yoke”. Esse suporte permite que o deslocamento vertical seja tomado com referência ao próprio corpo de prova. Este ensaio tem como objetivo obter a curva força x deslocamento, que possibilita avaliar a resistência à tração na flexão dos compósitos, bem como a resistência à tração na flexão residual.

Figura 3.7 - Configuração para ensaio de flexão



- a) Corpo de prova com aparelho Yoke;
- b) Entalhe para ensaio aberto;
- c) Corpo de prova aguardando ensaio
- d) Entalhe no corpo de prova

4 DOSAGEM

Foi adotado um programa experimental para definir os traços ideais de dosagem dos materiais, de forma que o produto final obtido apresentou as características desejadas.

Utilizou-se um traço de referência, a base de cimento CP-V-ARI e areia natural, na proporção de 1:2 em massa, isto é, uma porção de cimento para duas porções de areia.

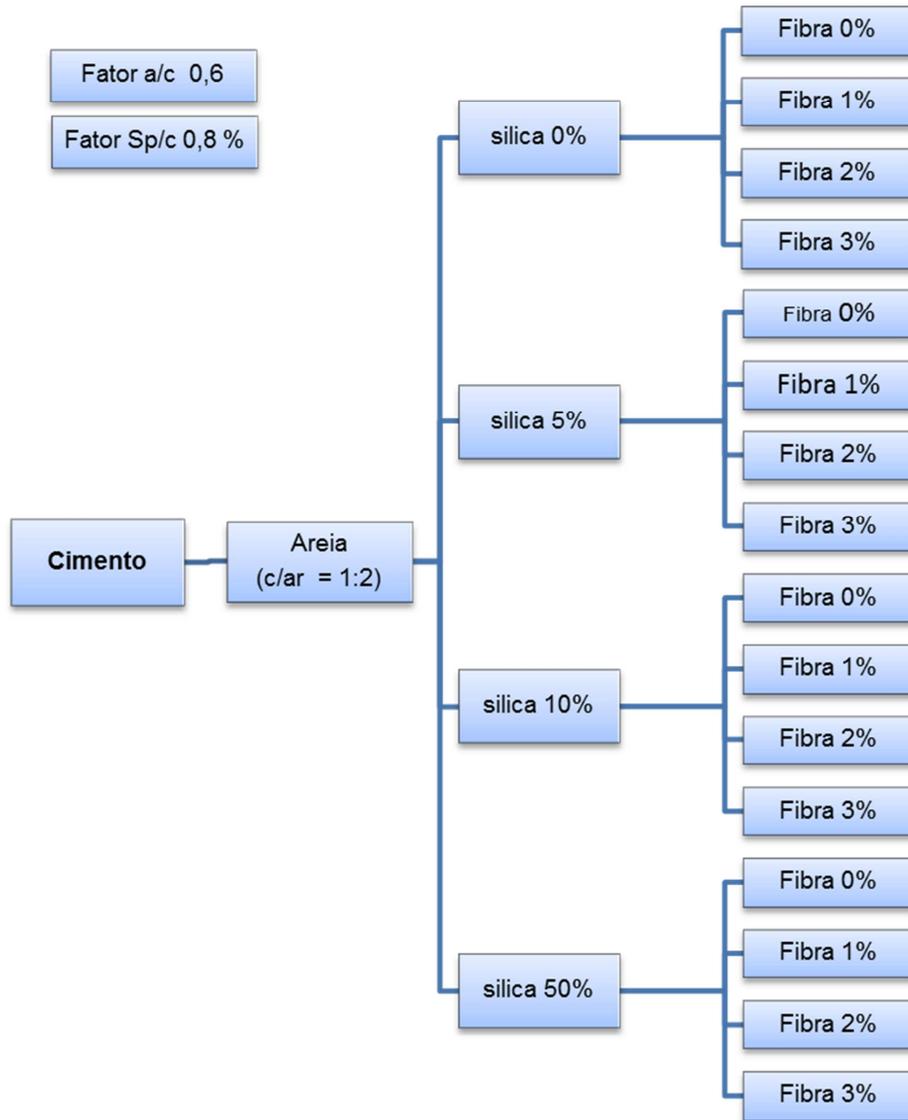
4.1 ESTUDO DO TRAÇO

Para o estudo e desenvolvimento do CDRF, foi fixado um traço de cimento e areia de 1:2, que não contém sílica ativa, nem fibras. Esse traço foi tomado como referência para a dosagem. Também foi adotada uma relação água/material cimentício de 0,6; Este valor levou em consideração o que prescreve a norma técnica NBR 6118-2007. A quantidade de aditivo químico superplastificante foi definida de acordo com o ensaio de compatibilidade entre o material cimentício e o aditivo utilizado. O método adotado para definir essa dosagem foi o Método de AITCIN, conforme Aitcin (2000). Este traço foi adotado como referência para análise das propriedades estudadas.

A partir do traço de referência foi adicionada sílica ativa nas taxas de 5%, 10% e 50%, em relação ao volume de cimento. Esta adição tem por finalidade melhorar a microestrutura do compósito, produzindo maior resistência mecânica e melhorias na aderência entre a matriz e as fibras.

Para cada compósito com taxas de sílica ativa definidas anteriormente, foram adicionadas fibras de polipropileno de alta tenacidade, nas taxas de 1%, 2% e 3%, em relação à massa de material cimentício. As fibras têm por finalidade conferir ductilidade ao CDRF. A figura 3.1 apresenta o fluxograma adotado para estudo do traço experimental, tendo como base o cimento.

Figura 4.1 - Fluxograma para traço experimental em estudo



Fonte: Autor

Desta forma obtiveram-se os seguintes traços, conforme apresentado na tabela 4.1.

Tabela 4.1 - Traço Experimental

Traço	Cimento	Areia	Sílica Ativa	Super-plastificante	Fibra PP	Fator a/mc
	kg	kg	g	g	g	l
T00-0/01	23	46	0,00	184	0,00	13,80
T00-1/02	23	46	0,00	184	405	13,80
T00-2/03	23	46	0,00	184	810	13,80
T00-3/04	23	46	0,00	184	1.214	13,80
T05-0/05	23	46	810	184	0,00	13,80
T05-1/06	23	46	810	184	416	13,80
T05-2/07	23	46	810	184	832	13,80
T05-3/08	23	46,	810	184	1.248	13,80
T10-0/09	17	34	1.197	136	0,00	10,20
T10-1/10	17	34	1.197	136	398	10,20
T10-2/11	17	34	1.197	136	797	10,20
T10-3/12	17	34	1.197	136	1.195	10,20
T50-0/13	15	30	5.282	120	0,00	9,00
T50-1/14	15	30	5.282	120	361	9,00
T50-2/15	15	30	5.282	120	721	9,00
T50-3/16	15	30	5.282	120	1.082	9,00

Onde: T00-2/03 tem-se: T00: indica o grupo de corpos de prova para determinado traço de compósito considerando a porcentagem de sílica ativa; 2: indicada a porcentagem de fibra adotada no compósito; 03: indica em ordem numérica os corpos de prova. Leitura da nomenclatura: O corpo de prova 03 contém 0% de sílica ativa e 2% de fibra PP.

Legenda: **TXX-X/XX**

T - Traço

XX – porcentagem de sílica no traço

X – Porcentagem de fibra PP

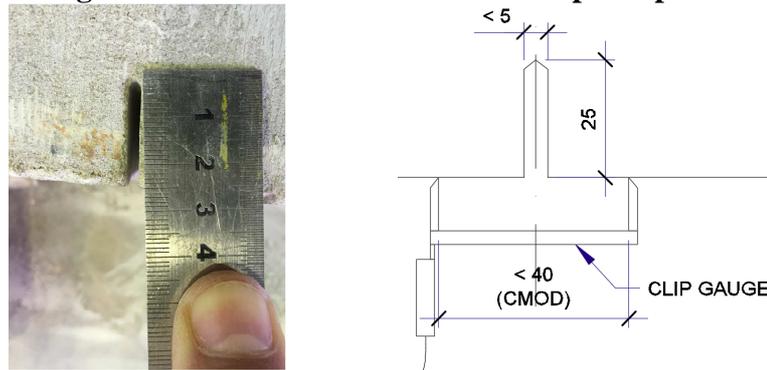
XX – número de ordem

4.2 INSTRUMENTAÇÃO E CONFIGURAÇÃO DO ENSAIO

Como já visto, para avaliação do comportamento à tração na flexão do CDRF em estudo, realizou-se o ensaio de flexão em três pontos em corpos de prova prismáticos, seguindo as recomendações da RILEM TC 162-TDF (2002).

Este ensaio é realizado em corpos de prova entalhados, sendo o entalhe central reto e passante com profundidade de 25 mm e 5 mm de largura. O entalhe foi executado com disco de corte diamantado na face lateral, conforme representado na Figura 4.2.

Figura 4.2 – Detalhe do entalhe no corpo de prova

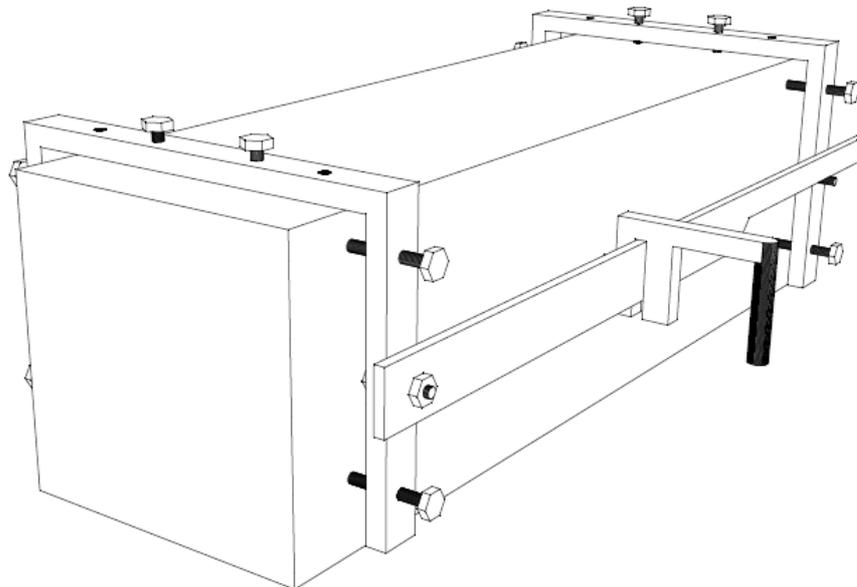


Fonte: Autor

Este entalhe tem como função induzir o fraturamento em um plano preferencial, elevando os níveis de solicitação em todo o material para o entalhe. Desta forma, durante a solicitação de carga no corpo de prova entalhado, sua deformação será localizada no plano entalhado (FERRARI, 2007).

A Figura 4.3 apresenta o corpo de prova com a montagem do dispositivo YOQUE onde será fixado o transdutor para medir o deslocamento vertical.

Figura 4.3- Aparelho YOKE montado no corpo de prova

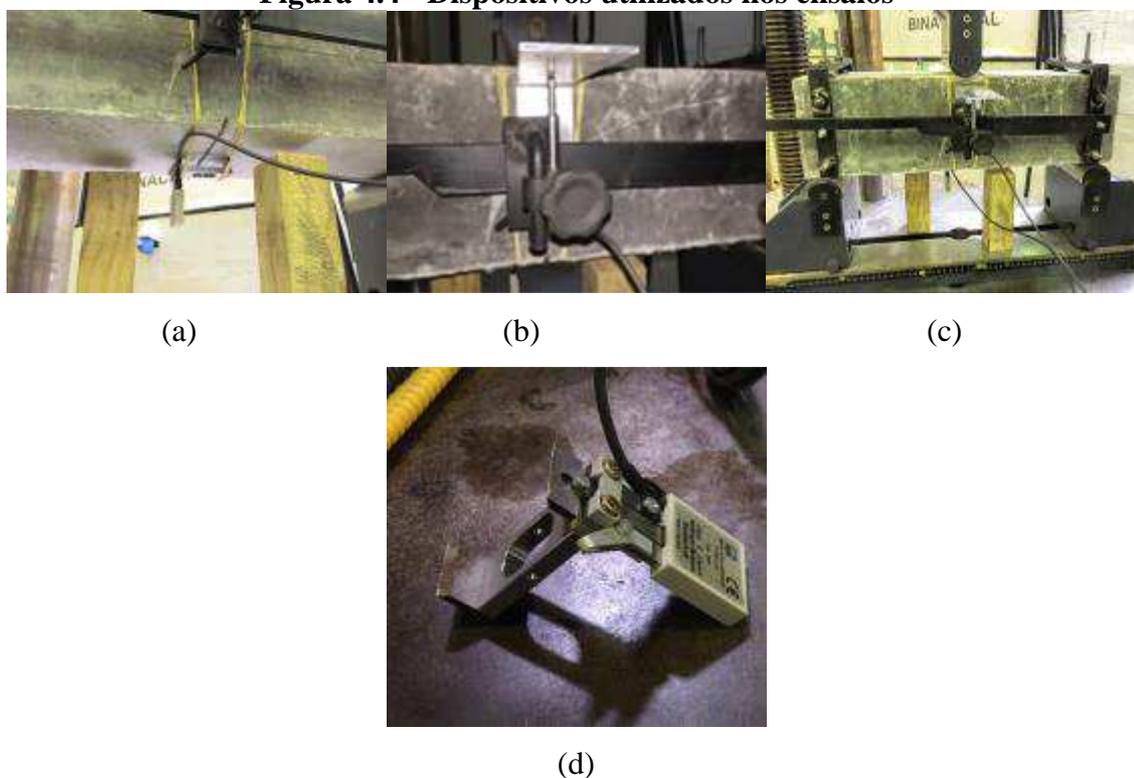


Fonte: Autor

Para medição dos deslocamentos verticais foi adotado um transdutor de deslocamentos Figura 4.4 (b), apoiado em um dispositivo denominado “Yoke”, figura 4.4 (c), permitindo que as leituras de deslocamentos fossem tomadas com o próprio corpo de prova como referência.

Para a medição e controle dos deslocamentos de abertura de fissura junto ao entalhe (CMOD), foi utilizado um extensômetro elétrico tipo *clip gauge* - Figura 4.4 (d). O ensaio se procedeu com aplicação de uma taxa de abertura do *clip gauge* de 0,3 mm/min para CMOD.

Figura 4.4 - Dispositivos utilizados nos ensaios



- a) *Clip gauge* instalado junto ao entalhe no corpo de prova;
- b) Transdutor de deslocamento instalado no aparelho Yoke;
- c) Corpo de prova com aparelho Yoke e os dispositivos instalados;
- d) *Clip gauge* utilizado para CMOD.

Fonte: Autor

Os ensaios foram realizados no Laboratório de Tecnologia do Concreto pertencente à Usina Hidrelétrica de Itaipu. O equipamento utilizado foi uma máquina universal de ensaios servo-hidráulica com capacidade para até 1000 kN. A Figura 4.5 apresenta o equipamento e seu sistema de aquisição de dados.

Figura 4.5 - Máquina universal de ensaios



(a)

(b)

(c)

- a) Sistemas de aquisição de dados;
 b) Prensa servo-hidráulica 200 ton;
 c) Certificado de calibração do equipamento.

Fonte: Autor

No Quadro 4.1 é apresentada a descrição geral dos equipamentos e instrumentos utilizados nos ensaios.

Quadro 4.1 - Características técnicas dos equipamentos e instrumentos de medição utilizados

Equipamentos e Instrumentos	Marca / Modelo	Características	Finalidade
Maquina universal de ensaios servo-controlada	TIMEGROUP / c/ célula de carga	Capacidade nominal de 1000 kN	Aplicação do carregamento nos corpos de prova
Sistema de aquisição de dados de extensômetro	HBM / MX 840A	Taxa de leitura 20 Hz	Aquisição automática de dados
<i>Clip Gauge</i>	HBM / DD1	Curso $\pm 2,5$ mm – resolução 0,01 mm	Medir o CMOD dos compósitos produzidos
Transdutor de deslocamento Axial	HBM / WI10	Curso 10 mm – resolução 0,01 mm	Medição dos deslocamentos
Suporte “YOKE”	Aço 1020, espessura 5 mm	Formato de régua de seção retangular	Suporte para fixação do transdutor de deslocamento

4.3 PROGRAMA DE ENSAIOS

Para o programa de ensaio foram confeccionados, conforme já descrito, 48 corpos de prova prismáticos com dimensões 15x15x50 cm e 80 corpos de prova cilíndricos 5x10 cm. Os corpos de prova prismáticos foram separados em 04 grupos definidos pela quantidade de sílica ativa no traço; Estes grupos foram divididos em conjuntos de 03 corpos de prova para cada porcentagem de fibra adicionada.

Os corpos de prova cilíndricos foram separados, sendo 02 corpos de prova para ensaios de compressão e 03 para ensaios de módulo de elasticidade.

4.4 PREPARAÇÃO DOS COMPÓSITOS

Para produção dos compósitos CDRF foram estabelecidos critérios, de forma a manter o mesmo padrão para todas as misturas, conforme descritos a seguir:

- Utilização de cimento do mesmo lote, devido à compatibilidade do aditivo;
- Compatibilização do aditivo superplastificante com o material cimentício;
- Separação das fibras até que se obtivesse 3 vezes o seu volume;
- Separação da água em duas partes, sendo 80% a primeira e 20% a segunda;

A composição do compósito seguiu a dosagem experimental. O Quadro 4.2 apresenta a composição e as características dos materiais utilizados. Para promover a mistura foi utilizada betoneira elétrica com capacidade de 120 litros; Todo o procedimento de seleção e preparo de materiais, mistura dos agregados, moldagem e cura dos corpos de prova foram executados no laboratório de Edificações do IFPR – Campus Foz do Iguaçu. Pode-se verificar na Figura 4.6 a disposição dos materiais preparados para serem lançados na betoneira.

Quadro 4.2 - Composição para produção do compósito

Material	Característica	Massa específica	Dosagem utilizada
Cimento CP-V ARI	Pulverulento	3,15 kg/dm ³	1,0
Areia	Média/ seca	2,65 kg/dm ³	2,0
Sílica Ativa	Não Densificada	2,22 kg/dm ³	5%, 10% e 50% em relação a massa de cimento
Aditivo Superplastificante Rheoset TecFlow 9030			*0,8 em relação ao material cimentício
Fibra de Polipropileno (PP)			1%, 2% e 3% em relação a massa de material cimentício
a/mc		1	0,6
Consumo de cimento (kg/m ³)			
*A dosagem do superplastificante (a/mc) foi baseada no ensaio de compatibilização pelo funil Marsh			

De posse dos materiais separados, adicionou-se, na betoneira em movimento, os materiais: cimento, sílica ativa e areia, postos para misturar por um minuto.

Figura 4.6 - Materiais para dosagem do compósito

Fonte: Autor

Após verificar uma mistura homogênea, foi adicionada a primeira parte da água de amassamento e misturado por mais um minuto; Nesta etapa obteve-se uma mistura muitas vezes sem trabalhabilidade.

Decorrido um minuto, foi adicionada à mistura a segunda parte da água com o aditivo diluído na mesma; A mistura adquiriu uma consistência aquosa na maioria dos casos.

Após mais um minuto, foram adicionadas as fibras em pequenas parcelas para evitar o empelotamento; Nesta etapa foi adicionado mais um minuto para a mistura adquirir uma homogeneidade, visto que em alguns traços obteve pouca trabalhabilidade. Ao total foram gastos, no máximo, 10 minutos para preparo da mistura; tempo recomendado pelo fabricante, devido à separação das fibras junto a argamassa. Esta recomendação seguiu-se apenas para alguns traços, sendo os que apresentaram pouca trabalhabilidade.

Durante o processo, foi observada visualmente a consistência da mistura, —e constatou-se a obtenção de uma razoável quantidade de argamassa, boa trabalhabilidade, e coesão, ótima dispersão das fibras. Portanto, o resultado foi um compósito de ótima qualidade, como pode ser visto nas Figura 4.7.

Figura 4.7 - Aspecto do compósito após a mistura



Compósito sem adição de fibra

Compósito com adição de fibra

Fonte: Autor

Após o processo de mistura, o material compósito foi acondicionado em formas de madeira confeccionadas para moldagem dos corpos de prova prismáticos apresentadas na figura 4.8; Estas recebiam previamente uma fina camada de desmoldante *Desmol* da fabricante VEDACIT, para facilitar a retirada dos corpos de prova das formas após seu endurecimento.

Figura 4.8 – Forma de madeira para moldagem dos corpos de prova



Fonte: Autor.

Para a moldagem dos corpos de prova não se fez uso de vibradores, pois a mistura estava com boa trabalhabilidade e coesão. Após a moldagem, os moldes foram cobertos com filme plástico de PVC para evitar a perda de água, conforme apresentado na Figura 4.9.

Figura 4.9 - Moldagem dos corpos de prova



Fonte: Autor

Os moldes ficaram armazenados por 24 horas e após este tempo, foram desmoldados cuidadosamente e mergulhados em água para promover a cura do compósito.

Os corpos de prova permaneceram submersos em água por 28 dias e, após este período, foram retirados e transportados para o Laboratório de Tecnologia de Concreto da Itaipu para a realização dos ensaios.

Para cada compósito também foram moldados 05 corpos de prova cilíndricos com 5 cm de diâmetro e 10 cm de altura, com a finalidade de obter a resistência à compressão e o módulo de elasticidade. Os corpos de prova cilíndricos foram confeccionados na mesma data da confecção dos corpos prismáticos e mantidos sob as mesmas condições.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 ENSAIO DE COMPRESSÃO E MÓDULO DE ELASTICIDADE

A Tabela 5.1 apresenta os valores médios das propriedades mecânicas do CDRF ensaiados, sendo a resistência à compressão (F_{cm}) e módulo de elasticidade (E_{cs}).

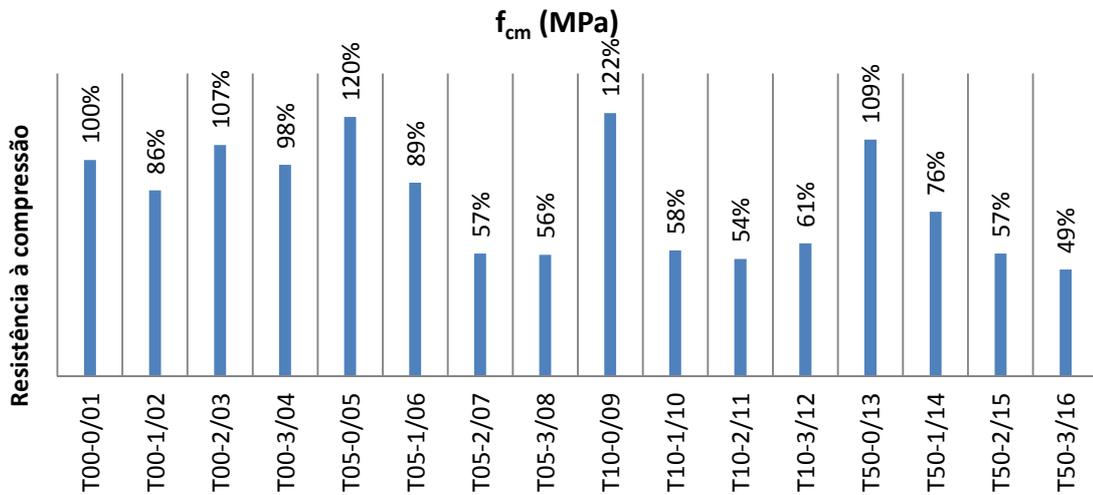
Tabela 5.1 - Resultados médios do ensaio à compressão do compósito

Compósito	F_{cm} (MPa)	E_{cs} (GPa)
T00-0/01	41,26	25,83
T00-1/02	35,45	22,87
T00-2/03	44,10	21,37
T00-3/04	40,34	20,34
T05-0/05	49,44	18,28
T05-1/06	36,88	18,20
T05-2/07	23,36	16,29
T05-3/08	23,15	13,39
T10-0/09	50,22	23,14
T10-1/10	23,97	16,37
T10-2/11	22,37	11,61
T10-3/12	25,34	11,95
T50-0/13	45,13	16,97
T50-1/14	31,34	15,09
T50-2/15	23,36	12,20
T50-3/16	20,34	8,68

Observação:
Foram ensaiados 02 corpos de prova à compressão axial e 03 corpos de prova para o módulo de elasticidade.

Pode-se verificar nos resultados apresentados na figura 5.1, que a adição da fibra não colaborou com grandes ganhos na resistência à compressão dos compósitos. Segundo Balaguru (1992), de particular importância no comportamento à compressão do concreto com fibras é o aumento de sua ductilidade.

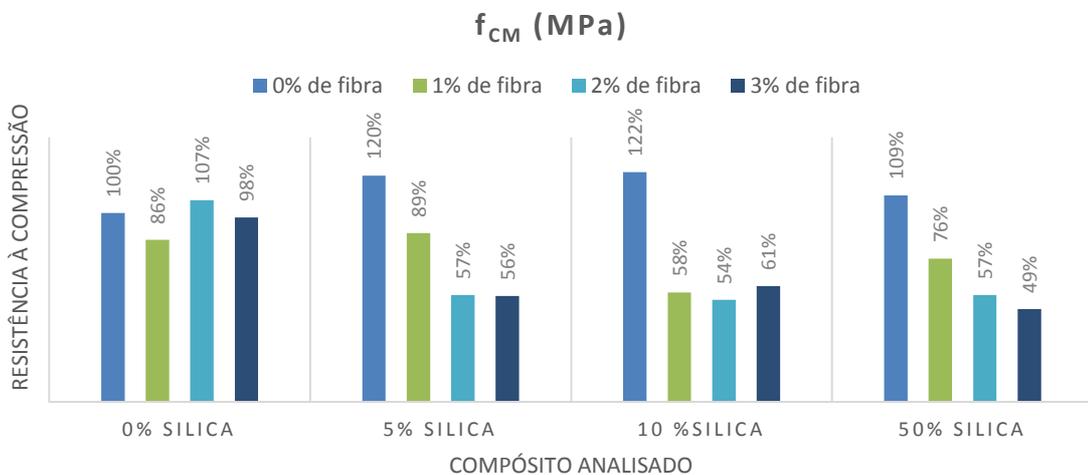
Figura 5.1 - Comparativo da resistência à compressão do compósito



Fonte: Autor

Analisando a adição de sílica, verifica-se através do gráfico (figura 5.2) que a resistência caiu consideravelmente com adição de 50% de sílica combinada com qualquer quantidade de fibra, o que leva a crer que adições acima de 15% não promovem ganhos de resistência, como coloca Mendes (2002).

Figura 5.2 - Análise da resistência à compressão pela adição de sílica ativa e fibras



Fonte: Autor

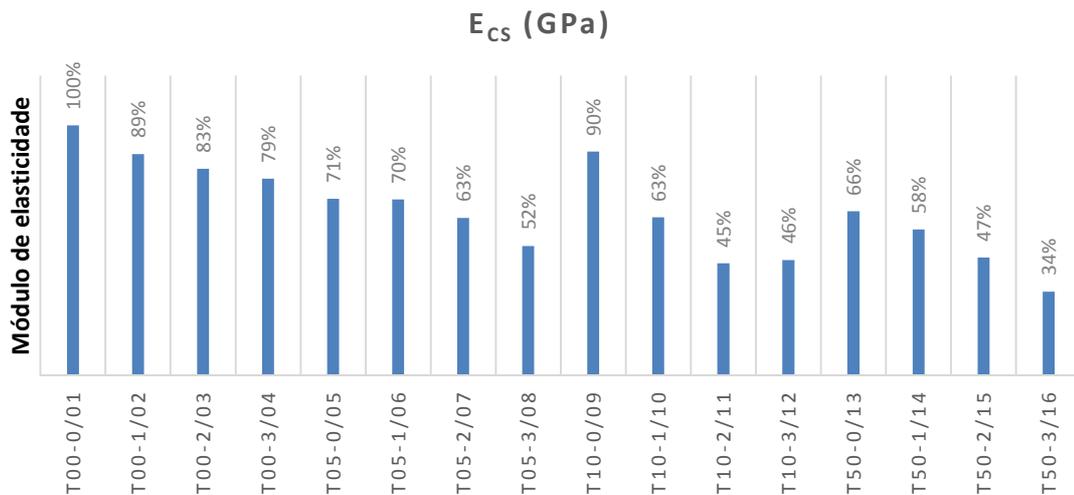
Pode-se verificar, analisando os resultados no gráfico, que os compósitos sem adição de sílica mantiveram uma resistência característica sem muitas perdas, mantendo uma variação em torno de 10% comparados ao compósito sem adição de fibra T01-0/01. Quando analisados os compósitos pela adição de sílica, pode-se constatar que os compósitos sem fibra tiveram suas resistências aumentadas em torno de 20%. Um ganho considerável foi obtido no compósito com 5% de sílica, porém sem fibra; Já o compósito com 50% de adição de sílica

obteve um ganho pouco considerável, de apenas 9%, confirmando estudos anteriores que apontam que, com adições acima de 15%, não há ganhos em resistência.

Analisando os compósitos pela adição de fibra pode-se observar grandes perdas de resistência: Somente o compósito com 2% de adição de fibra obteve um ganho, porém, foi pouco satisfatório, de apenas 7%, ocorrido exclusivamente no compósito sem adição de sílica. A partir destes resultados, infere-se que a fibra apenas ocupa o lugar dos vazios no compósito, sem proporcionar ganhos na resistência à compressão; Também pode-se confirmar que os compósitos com adição de sílica tiveram maiores perdas, efeito provocado pelo travamento das fibras, o que ocasiona arranchamento e perda de ductilidade, colocação feita por Garcez (2009).

Em relação ao módulo de elasticidade dos compósitos, pode-se verificar pelo Gráfico 5.3 que a adição de fibras contribuiu para a diminuição do módulo de elasticidade, confirmando a teoria de Ferrari (2007).

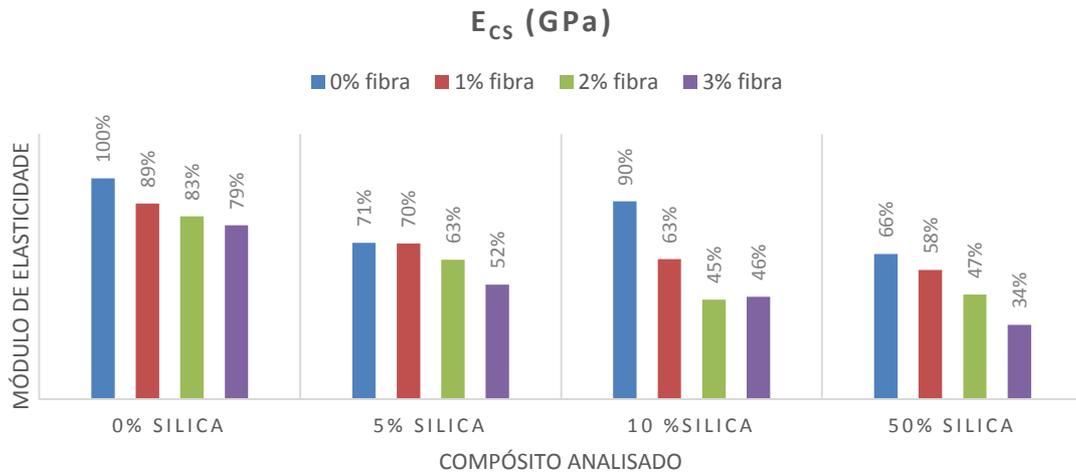
Figura 5.3 - Comparativo do módulo de elasticidade do compósito



Fonte: Autor

Pelo gráfico 5.4, pode-se observar que os compósitos tiveram grande perda no módulo de elasticidade com a adição de fibra. O compósito T50-3/16 demonstrou o pior desempenho, uma perda acima de 60%. Analisando os grupos conclui-se que a sílica pouco influenciou para o desempenho ruim do compósito, afinal, todos os grupos tiveram perda no módulo de elasticidade, o que comprova as previsões de Ferrari (2007).

Figura 5.4-Análise dos resultados do módulo de elasticidade pela adição de sílica e fibra

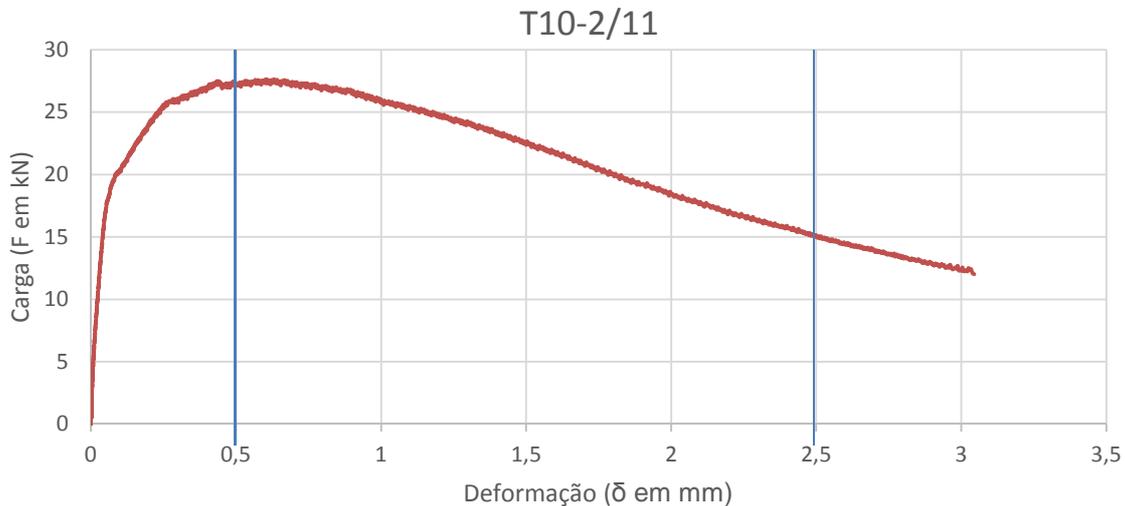


Fonte: Autor

5.2 ENSAIO DE TRAÇÃO NA FLEXÃO

Utilizando os conceitos da RILEM TC 162-TDF, são apresentados os valores de forças e resistências calculados com base em suas recomendações. O processo de obtenção dos dados será apresentado para o compósito T10-2/11 como modelo; A figura 5.5 apresenta a curva obtida pelo ensaio de carga x deslocamento ($F \times \delta$) para este compósito.

Figura 5.5 - Curva $F \times \delta$ do compósito T10-2/11

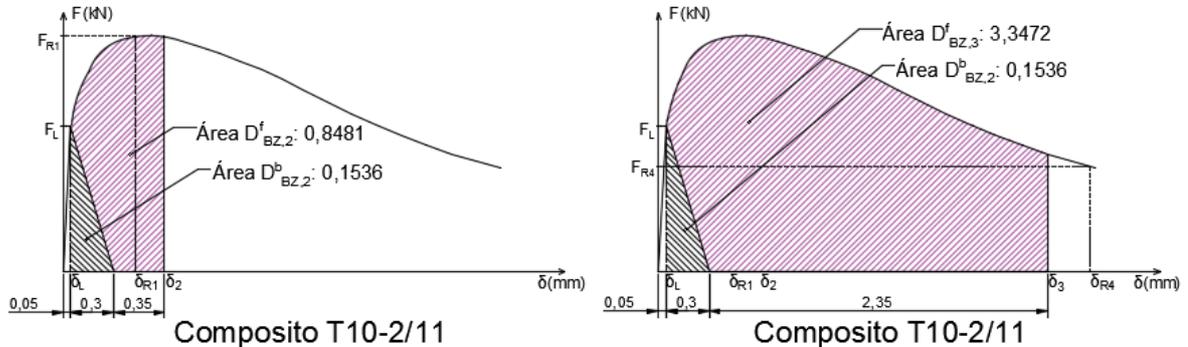


Fonte: Autor

A parcela de tenacidade $D_{BZ,2}^b$ e $D_{BZ,3}^f$ é obtida pela área sob a curva $F-\delta$, onde F é a força aplicada ao corpo de prova e o δ é o seu deslocamento vertical demonstrado na figura 5.6, os valores obtidos são transformados em resistência flexional equivalente ($f_{eq,2}$ e $f_{eq,3}$) em diferentes níveis de deslocamentos δ_2 e δ_3 ; Assim, a capacidade de carga do CDRF em relação

a um valor pré-definido de flecha é avaliado através do conceito de resistência flexional residual ($F_{R,1}$ e $F_{R,4}$).

Figura 5.6 – Avaliação pelos critérios da RILEM para o compósito T10-2/11



Fonte: Autor

A curva, assim como a área encontrada, foi obtida no software AutoCAD, pelo processo de desenho sobreposto. Após os dados coletados pelo ensaio serem lançados no software Excel, foi elaborado um gráfico, posteriormente transferido para o AutoCAD e escalado para se manterem os dados reais do ensaio. Por sobreposição foi desenhada novamente a curva com o comando PLINE, uma poligonal fechada e extraída a área em questão. De posse das áreas e dos demais dados obtidos pelo gráfico, foi elaborada uma planilha no Excel para os cálculos das forças e resistência solicitadas através das recomendações da RILEM. Os valores médios obtidos encontram-se na tabela 5.2.

Tabela 5.2 – Forças e resistências conforme RILEM (2002)

Compósito	F_L	F_M	$F_{R,1}$	$F_{R,3}$	$f_{fct,L}$	$f_{eq,2}$	$f_{eq,3}$	$f_{R,1}$	$f_{R,3}$
T00-1/02	15,52	15,53	14,53	-	3,69	0,34	0,29	3,45	-
T00-2/03	15,65	15,65	11,62	7,58	3,72	0,40	0,34	2,76	1,80
T00-3/04	16,60	20,06	19,58	-	3,94	0,34	0,29	4,65	-
T05-1/06	15,71	20,61	20,42	12,06	3,73	0,35	0,25	4,85	2,86
T05-2/07	14,43	18,53	17,96	11,99	3,43	0,34	0,28	4,27	2,85
T05-3/08	18,01	21,97	21,68	14,77	4,28	0,40	0,33	5,15	3,51
T10-1/10	11,76	15,26	14,96	10,12	2,79	0,38	0,30	3,55	2,40
T10-2/11	17,02	27,64	27,17	19,41	4,04	0,40	0,31	6,46	4,61
T10-3/12	12,28	15,63	14,52	-	2,92	0,31	0,34	3,45	-
T50-1/14	12,22	15,79	15,33	9,63	2,90	0,42	0,31	3,64	2,29
T50-2/15	14,80	28,28	27,45	23,17	3,51	0,42	0,39	6,52	5,51
T50-3/16	10,64	12,13	11,93	9,29	2,53	0,42	0,37	2,83	2,20

A Tabela 5.2 também apresenta o valor da força máxima (F_M) do compósito, que corresponde à máxima alcançada ao longo do carregamento.

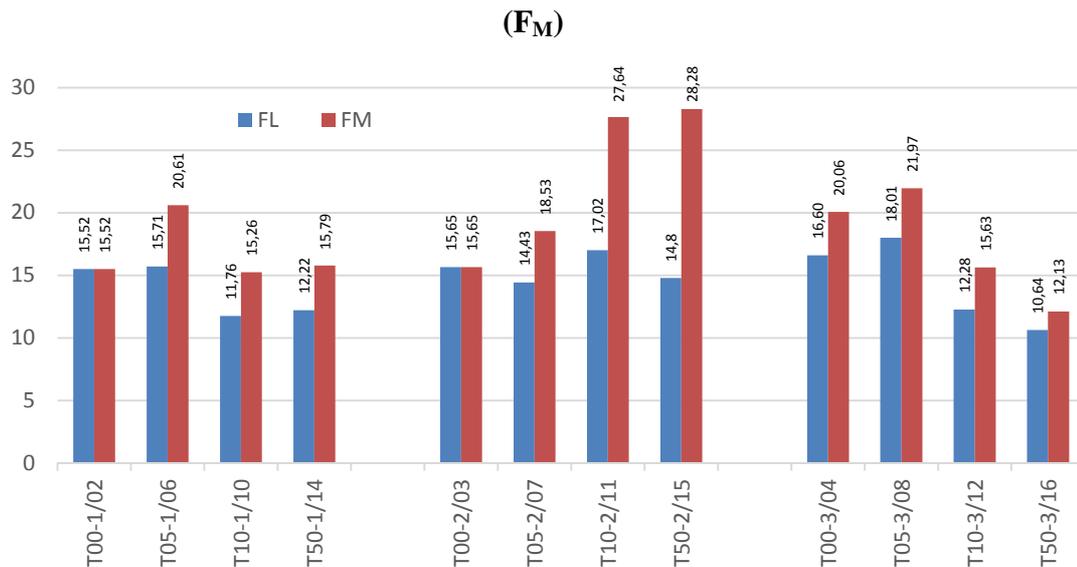
A RILEM adota o valor de F_L , que é a força máxima de *offset*, descartando-a força de primeira fissura, utilizando-se de uma tendência europeia (FERRARI, 2007).

Com base nos resultados apresentados na Tabela 5.2, pode-se verificar, juntamente com o gráfico da Figura 5.7, o comportamento dos CDRFs analisados. De acordo com a RILEM, o valor de $f_{ct,L}$ corresponde a tensão referente à força F_L e representa a parcela de resistência proveniente da contribuição da matriz cimentícia. Assim, pode-se dizer que os compósitos com adição de sílica ativa tiveram um melhor ganho de resistência, porém não satisfatório quanto a resistência flexional.

Também pode-se constatar através da figura 5.7 o aumento das forças (F_L e F_M) com o aumento da taxa de fibra. Quando aumentada a taxa de sílica ativa, não há um padrão na resposta dos compósitos.

Na taxa de 1% de fibra o aumento na taxa de sílica prejudicou o compósito, sendo que na taxa de 2% de fibra o aumento da sílica ativa melhorou. Na taxa de 3% de fibra, o compósito teve o pior comportamento com o aumento da porcentagem de sílica ativa.

Figura 5.7 - Gráfico das forças máximas de *offset* (F_L) e forças máximas do compósito

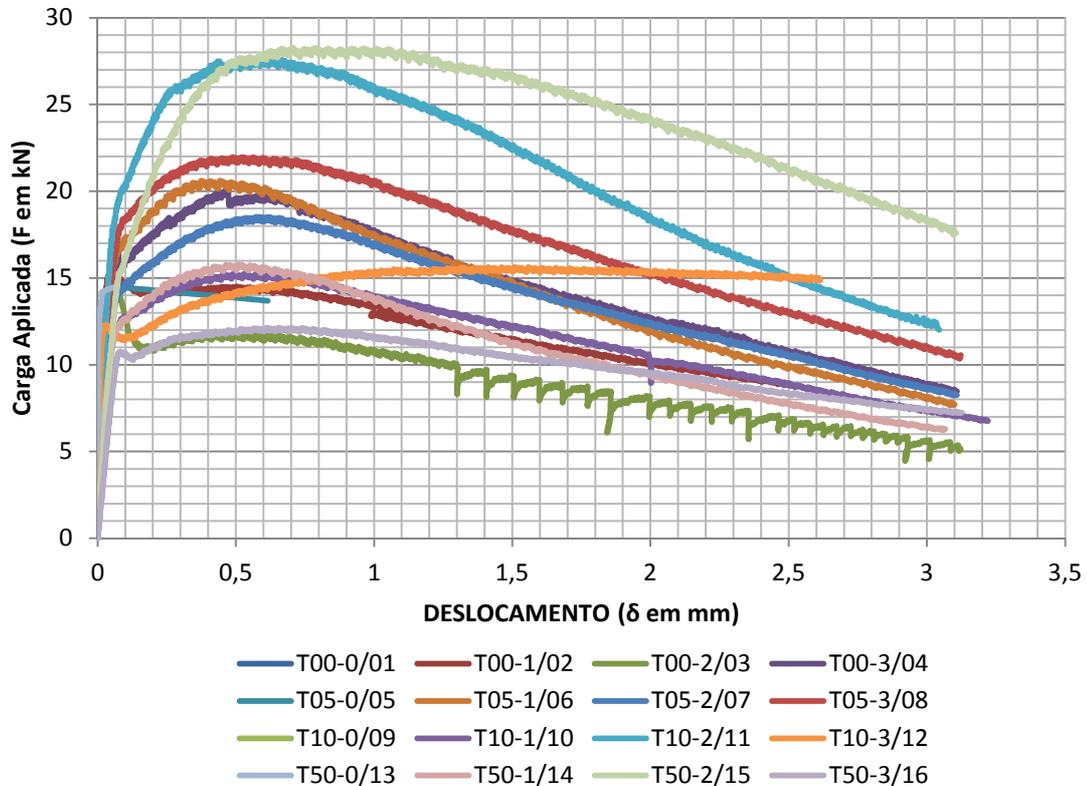


Fonte: Autor

Os valores de resistência flexional equivalentes - $f_{eq,2}$ e $f_{eq,3}$ - representam o comportamento do CDRF proveniente da parcela de contribuição das fibras na resistência do material. Desta forma, analisando os valores encontrados, é possível afirmar que as fibras contribuíram consideravelmente para o aumento da resistência flexional em todos os compósitos, como pode-se verificar no gráfico Força x Deslocamento vertical apresentado na figura 5.8. A quantidade de fibra no CDRF contribuiu para um melhor desempenho do mesmo. Analisando os compósitos pelas dosagens de fibra PP, demonstrou-se que os

compósitos com 1% de fibra tiveram ganhos de forças (F_M), porém inferior aos compósitos com 2% e 3% de fibra.

Figura 5.8 - Gráfico Força x Deslocamento vertical do compósito



Fonte: Autor

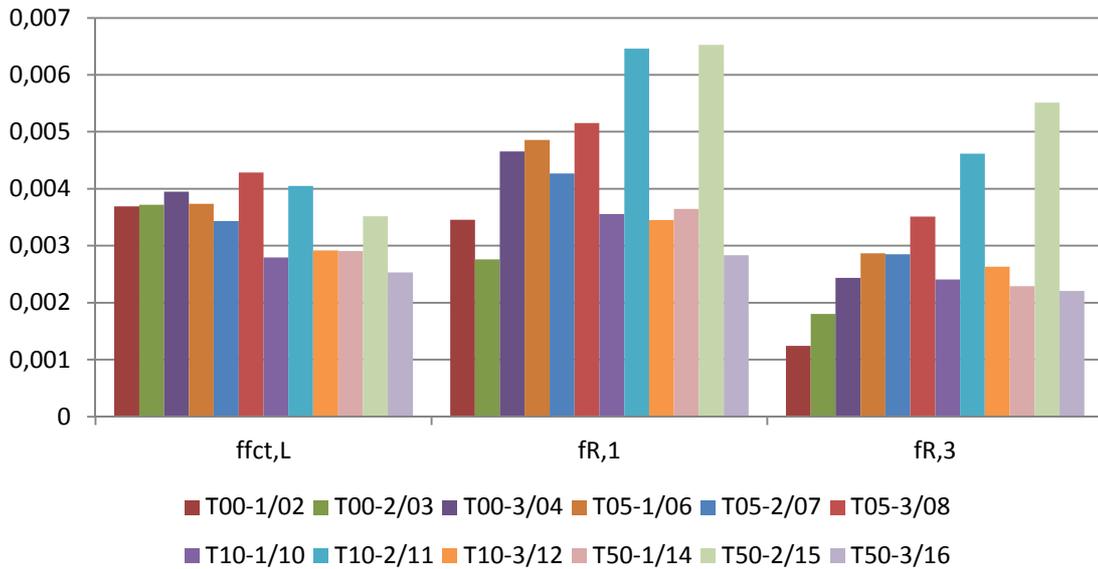
O compósito com 2% de fibra obteve uma melhor resistência à flexão. Como pode-se ver pelo gráfico da Figura 5.9 de forças resistentes residuais, os compósitos tiveram um ganho de capacidade de carregamento superior às dosagens de 1% e 3%, visto que os compósitos com 3% de fibra na dosagem, após fissuração, resultaram em uma capacidade de carregamento menor para alguns corpos de prova.

Analisando o gráfico da Figura 5.9, percebe-se que a dosagem de sílica em alta porcentagem, como 50%, contribuiu para o desempenho do compósito quando do esforço à flexão. Visualmente, é possível constatar este ganho no gráfico das forças máximas de *offset* e do compósito - Figura 5.7, parcela esta devida ao efeito de travamento da fibra, provocado pela incorporação de sílica ativa, que promove uma diminuição da porosidade e torna a microestrutura do compósito mais densa e compacta, resultando em um travamento das fibras na microestrutura do compósito, conforme coloca Vieira et al (1997).

O compósito com 10 % e 50% de sílica e 2% de fibra demonstrou um desempenho melhor para todos os casos. Através da figura 5.9 depreende-se que, tanto a dosagem de fibra como a de sílica visaram contribuir para a ductilidade do compósito. Para a dosagem com 3%

de fibra e 50% de sílica o comportamento foi inesperado, visto que o desempenho do compósito ficou abaixo dos demais. A porcentagem elevada de sílica e fibra permitiu muitos vazios no compósito e conseqüentemente, o deslizamento da fibra quando da atuação do carregamento.

Figura 5.9 - Relação entre resistência residual e resistência da matriz



Fonte: Autor

Em vários compósitos a resistência flexional equivalente ($f_{eq,2}$ e $f_{eq,3}$) superou a resistência apenas da matriz ($f_{fct,L}$), durante o carregamento.

Os compósitos com 2% de fibra, em todos os ensaios, atingiram ganhos na sua resistência flexional equivalente igual ou superior à resistência da matriz.

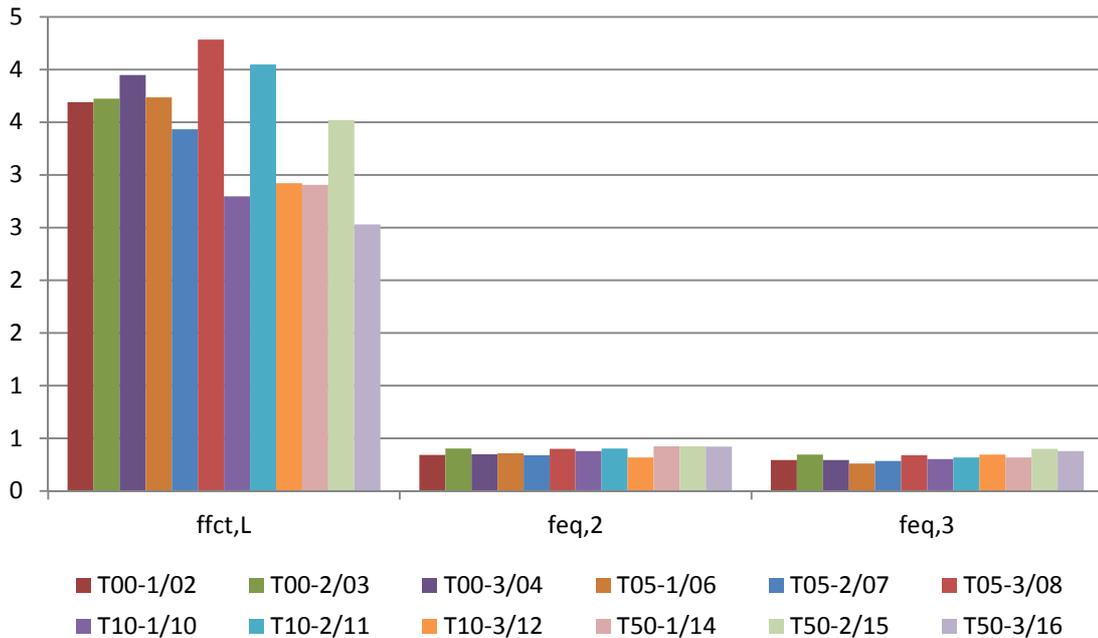
Figura 5.10 - Gráfico dos valores das resistências do compósito



Fonte: Autor

Com base nos resultados obtidos pelos compósitos, vale ressaltar que houve um ganho considerável de carregamento do compósito. A absorção de energia pelas fibras contribuiu para a resistência do compósito, dando-lhe a ductilidade desejada, como demonstra o gráfico apresentado na figura 5.11, que representa o desempenho das fibras na absorção de energia de carregamento.

Figura 5.11 – Ganho na resistência flexional equivalente do compósito



Fonte: Autor

A figura 5.12 demonstra o fissuramento ocorrido nos corpos de prova durante o carregamento.

Figura 5.12 - Fissuramento do CDRF após carregamento



Fonte: Autor

Pode-se verificar pelas imagens a atuação das fibras durante o carregamento até seu rompimento. Também é apresentado o fissuramento frágil do compósito sem as fibras.

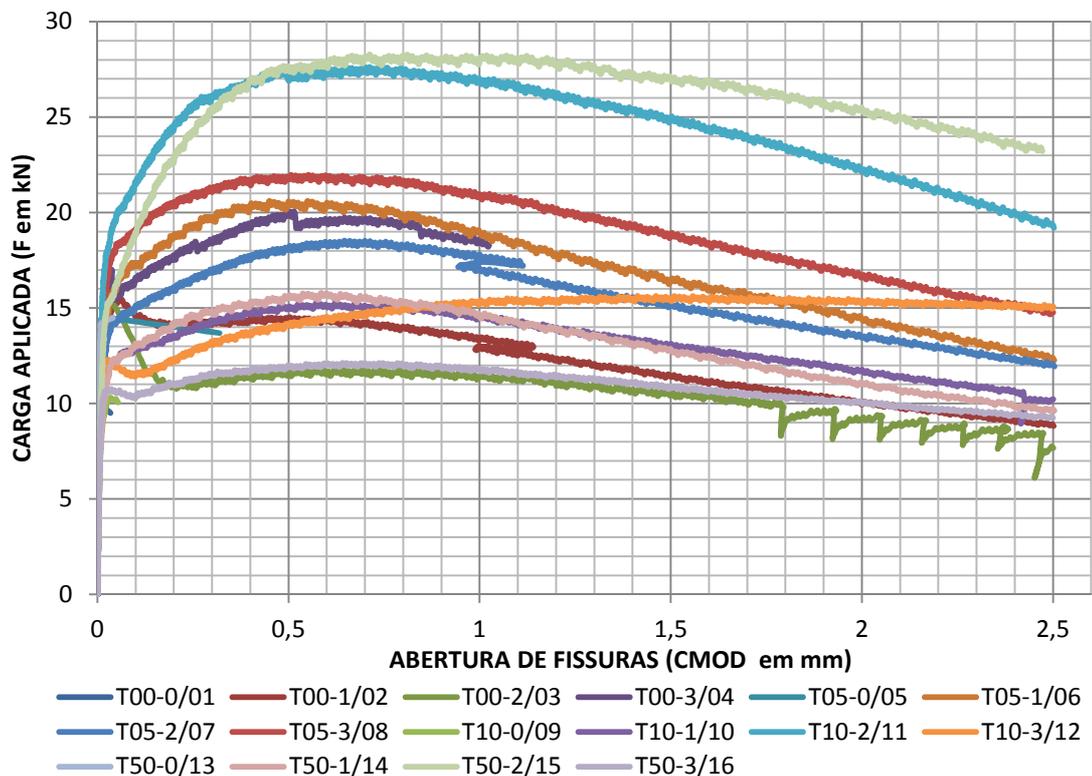
Desta forma, conclui-se que, de acordo com Li (2007), uma dosagem de 2% de fibras no compósito contribui para sua micromecânica, pois promove ganho de energia, decorrente da tenacidade das fibras, e ductilidade para o compósito, aumentando a resistência nas forças de flexão e tração.

5.2.1 Curvas CMOD

As curvas CMOD dos ensaios realizados encontram-se no Apêndice B. Para representar o comportamento de cada compósito, foi selecionada, dentre as três curvas obtidas nos ensaios de cada grupo, a que apresentou melhor desempenho no grupo. Sendo essa curva “média” adotada como a curva representativa do compósito.

A Figura 5.13 apresenta as curvas “médias” CMOD dos compósitos analisados. Como pode-se verificar, a presença das fibras no compósito melhorou o seu comportamento frágil. Houve um ganho de energia e elevação da resistência antes e após a fissuração da matriz, melhorando gradualmente a ductilidade do compósito.

Figura 5.13 - Curvas CMOD dos compósitos



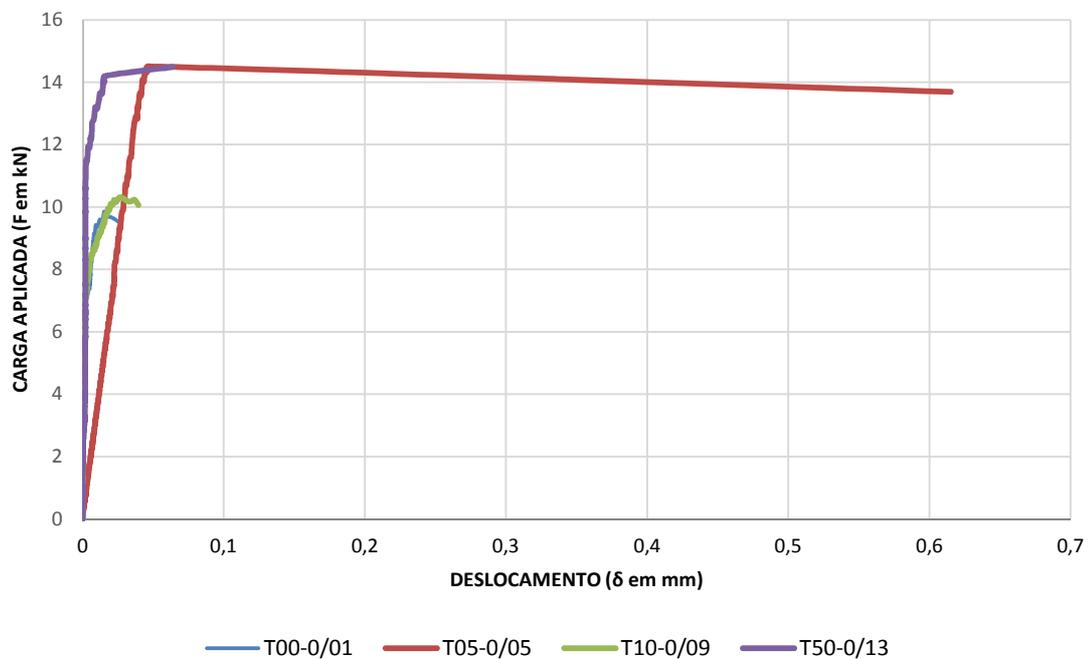
Na mesma linha, verifica-se a contribuição da sílica para o aumento da resistência a partir do travamento das fibras, conforme exposto no item anterior.

Com a incorporação de 2% de fibra, elevou-se a capacidade de absorção de energia do compósito T50-2/15 e T10-2/11 em relação aos demais compósitos.

A sílica contribuiu para o aumento da resistência à compressão nos compósitos com 0% de fibra, quanto a resistência à tração na flexão, entretanto, houve um desempenho satisfatório para o compósito T05-0/05 com 5%, T10-0/09 com 10% e T50-0/13 com 50% de sílica sobre o compósito T00-0/01 com 0% de adição de sílica e 0% de fibra, apresentado na figura 5.14.

Figura 5.14 - Compósito com 0% de fibra

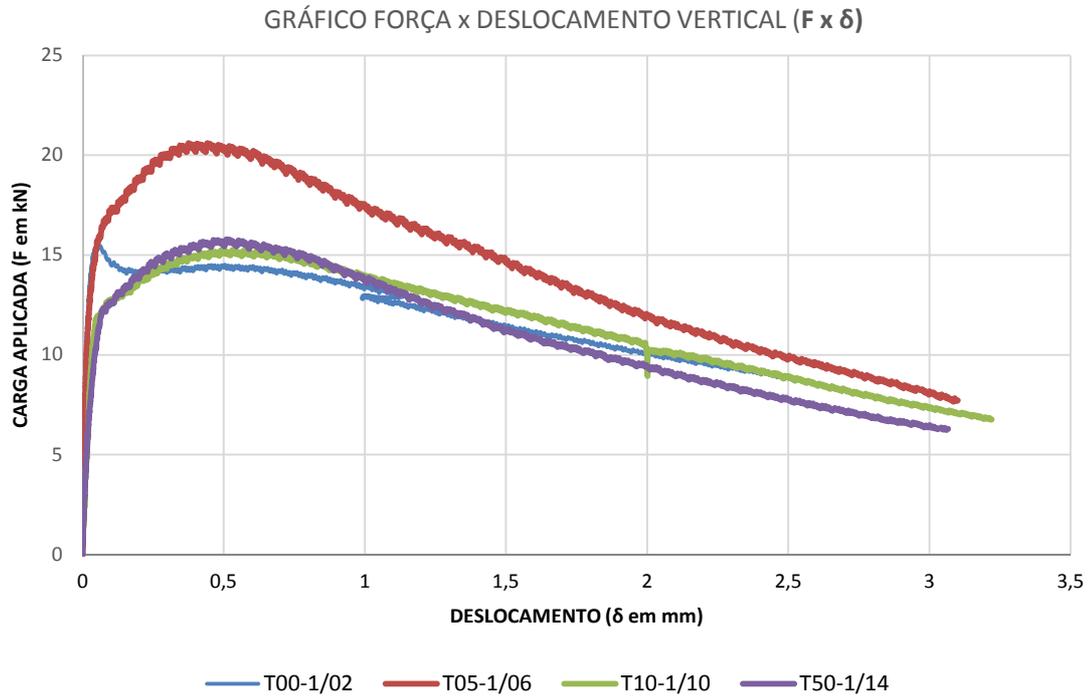
GRÁFICO FORÇA x DESLOCAMENTO VERTICAL ($F \times \delta$)



Fonte: Autor

Nos resultados obtidos pelos ensaios, as dosagens com 1%, 2% e 3% deram um ganho satisfatório ao CDRF, porém, a dosagem de 2% demonstrou um melhor desempenho, tanto antes, quanto depois do fissuramento, elevando consideravelmente a resistência ao carregamento.

Figura 5.15 - Compósito com 1% de fibra



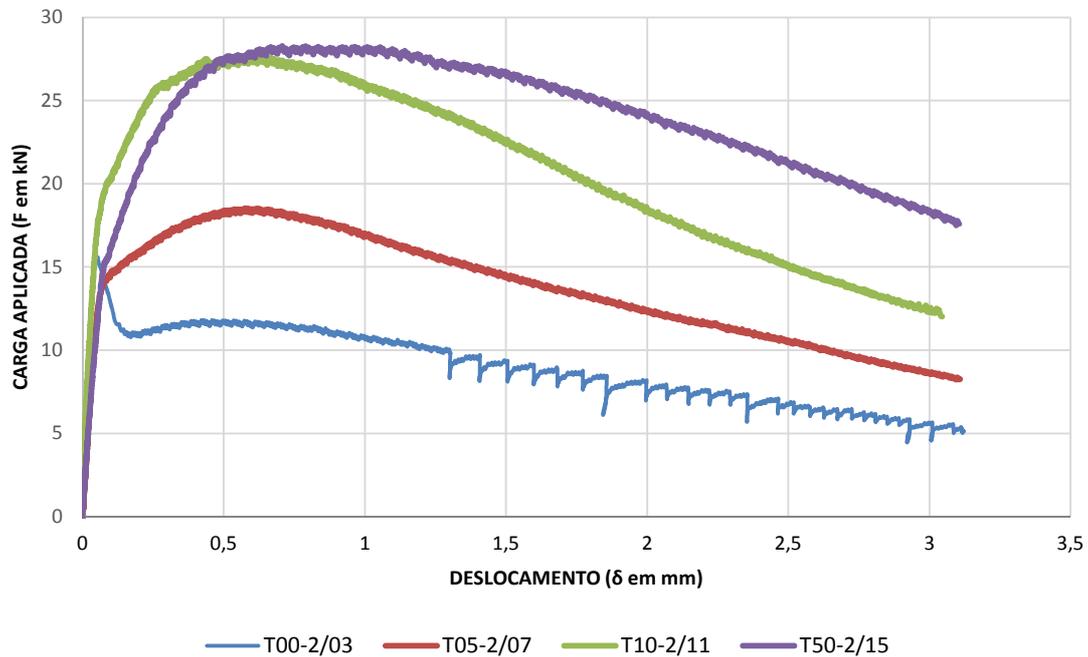
Fonte: Autor

Nas dosagens de 1% e 3% o compósito teve sua resistência aumentada, porém como consta nas curvas CMOD apresentadas na figura 5.15, para a dosagem de 1% de fibra, após a ruptura do compósito, houve uma queda de resistência, devido a necessidade das fibras absorverem a energia do carregamento. Assim, não houve aumento da resistência, apenas a manutenção da resistência durante o carregamento.

Com a presença da sílica ativa, a ruptura da matriz é precedida por um aumento no carregamento, como demonstram as curvas apresentadas no gráfico da figura 5.15.

Figura 5.16 – Compósito com 2% de fibra

GRÁFICO FORÇA x DESLOCAMENTO VERTICAL ($F \times \delta$)



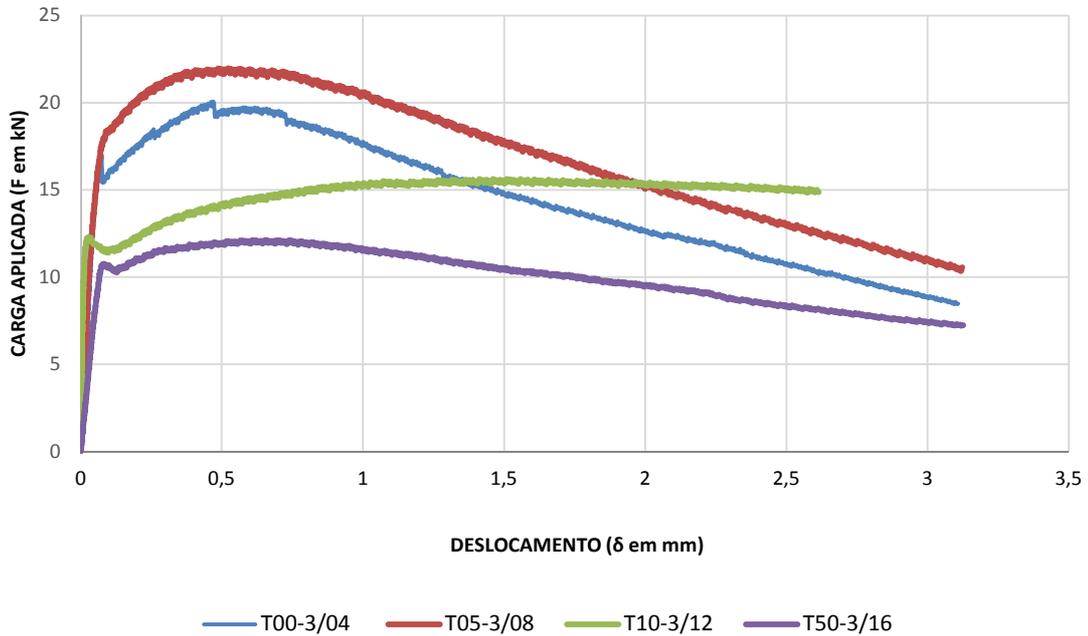
Fonte: Autor

Nos compósitos com 3% de fibra, houve um ganho de resistência: as fibras passaram a absorver a energia do fissuramento, elevando a capacidade de carregamento do compósito e mesmo após o fissuramento, continuou absorvendo energia, o que manteve a sua resistência durante o carregamento. Portanto, houve um aumento em sua ductilidade. Pode-se observar na figura 5.17, no traço T50-3/16, que a resistência do CDRF foi baixa, salientando que a dosagem da sílica foi de 50%, constatou-se que a sílica não contribuiu para dosagem com 3% de fibra. Na verdade, promoveu uma baixa resistência flexional do compósito e reduziu sua ductilidade. Assim, não é recomendada a utilização de uma faixa acima de 3% de fibra para dosagens elevadas de sílica.

Além disso, a dosagem de sílica ativa causou um aumento do carregamento após a ruptura da matriz.

Figura 5.17 - Compósito com 3% de fibra

GRÁFICO FORÇA x DESLOCAMENTO VERTICAL (F x δ)

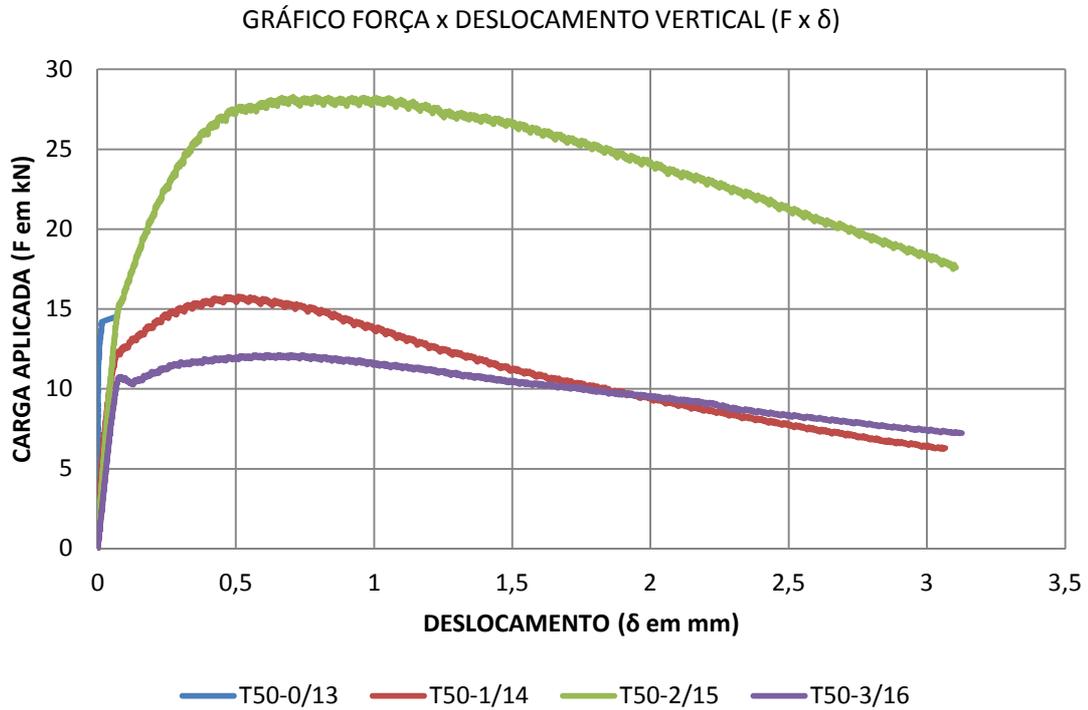


Fonte: Autor

Nas dosagens com 2% de fibra, o CDRF conseguiu o melhor desempenho. Em todos os traços houve ganho de resistência após o fissuramento: as fibras absorveram energia e mantiveram um aumento de resistência ao longo do carregamento. Pode-se dizer que o material, tanto antes quanto após o fissuramento, obteve grande ganho de ductilidade com essa dosagem, mesmo com 50% de sílica adicionado ao traço, o que pode ser confirmado pela curva do traço T50-2/15, apresentado nas figuras 5.16 e 5.18.

É importante ressaltar que a presença da sílica ativa colaborou com o aumento do carregamento da matriz após sua fissuração, promovendo ganho de resistência.

Figura 5.18 - Gráfico Força x Deslocamento vertical em função da porcentagem de sílica ativa 50%



Fonte: Autor

Com esta análise, pode-se afirmar que, segundo Li (2007), a dosagem de fibra em pequenos teores tende a melhorar o comportamento do material concreto, conferindo-lhe a característica de ductilidade e por conseguinte, garantindo ganhos em sua resistência à tração na flexão.

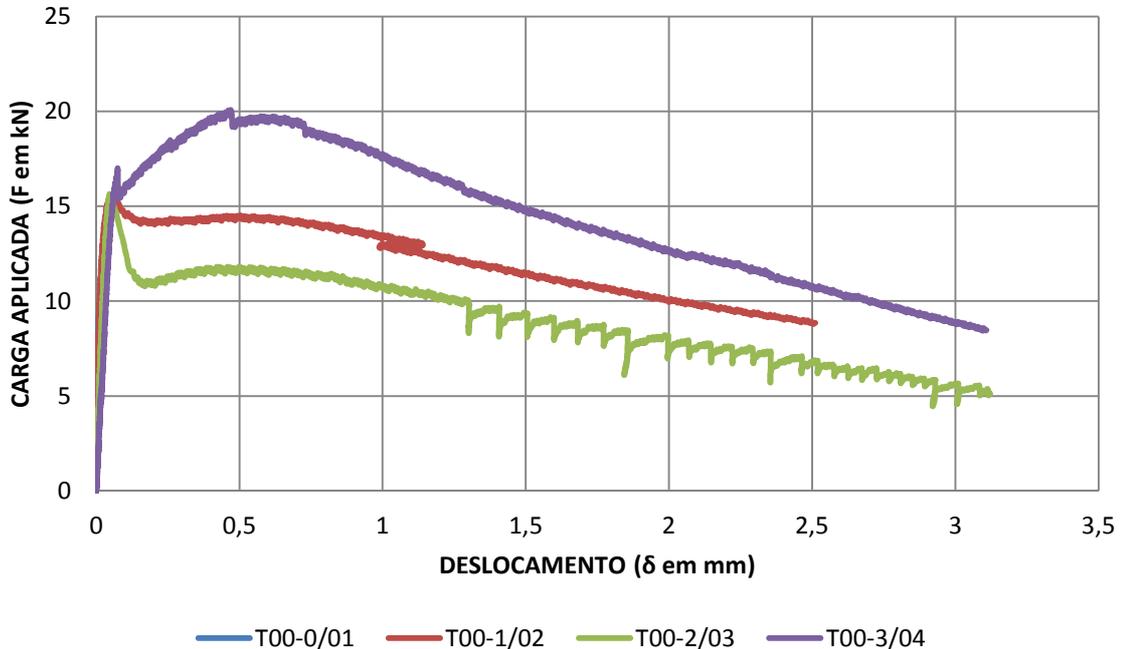
5.2.2 Considerações quanto a dosagem do CDRF

Os compósitos foram analisados individualmente através das curvas apresentadas pelos ensaios, como segue.

5.2.2.1 Traços de CDRF com adição de 0% de sílica:

Figura 5.19 - Compósito com 0% de sílica ativa

GRÁFICO FORÇA x DESLOCAMENTO VERTICAL (F x δ)



Fonte: Autor

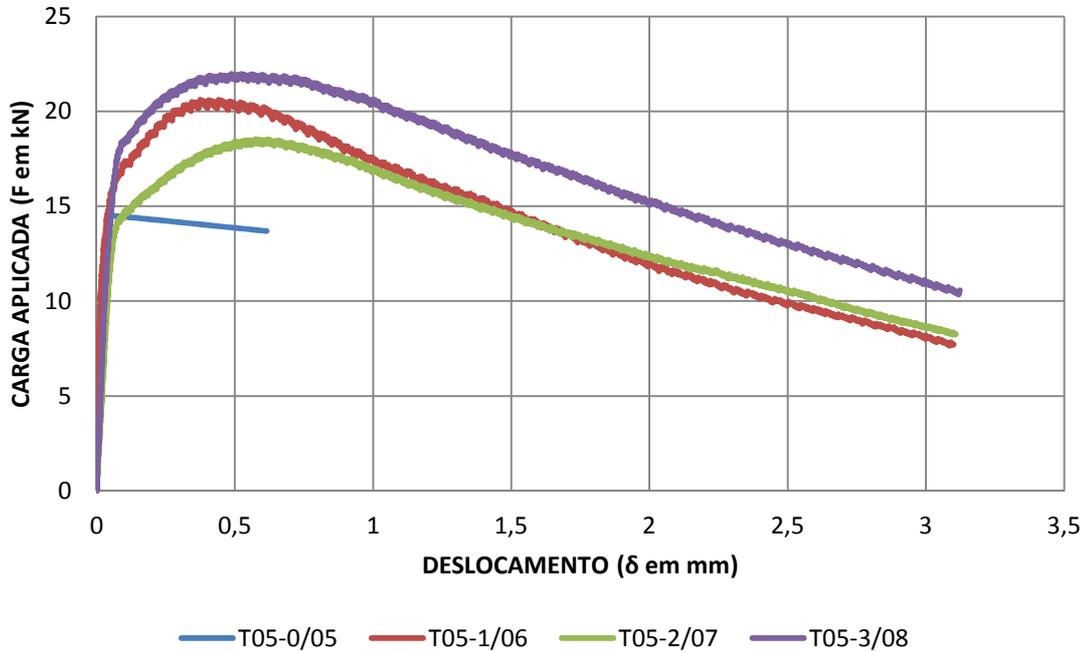
Observando a figura 5.19, verifica-se uma ruptura frágil para o compósito T00-0/01, sendo que material rompeu facilmente com pouca carga, situação esperada para concretos sem adição de fibras, pois estes apresentam resistência à tração baixa e não apresentam ductilidade. O compósito T00-1/02 adquiriu ganho de resistência até o fissuramento, mas após o fissuramento, o material teve um decréscimo em sua resistência residual, não apresentando ganhos consideráveis a sua resistência flexional. Portanto, o material apresentou pouca ductilidade.

O compósito T00-2/03, apresentou um grande ganho antes do fissuramento, porém demonstrou grande perda residual após o mesmo. O material continuou resistindo durante o carregamento com considerável aumento de sua resistência. Portanto, este material apresenta baixa ductilidade; Já o compósito T00-3/04, apresentou uma elevada resistência até o fissuramento, e após este, obteve grande ganho de resistência, contudo, não conseguiu conservar sua energia, perdendo sua resistência ao longo do carregamento;

5.2.2.2 Traços de CDRF com adição de 5% de sílica:

Figura 5.20 - Compósito com 5% de sílica ativa

GRÁFICO FORÇA x DESLOCAMENTO VERTICAL (F x δ)



Fonte: Autor

Com base no gráfico apresentado na figura 5.20, pode-se comprovar que o compósito T05-0/05, mesmo com a adição de 5% de sílica, manteve seu comportamento frágil, no entanto, adquiriu elevada resistência, em razão da porcentagem de sílica no traço.

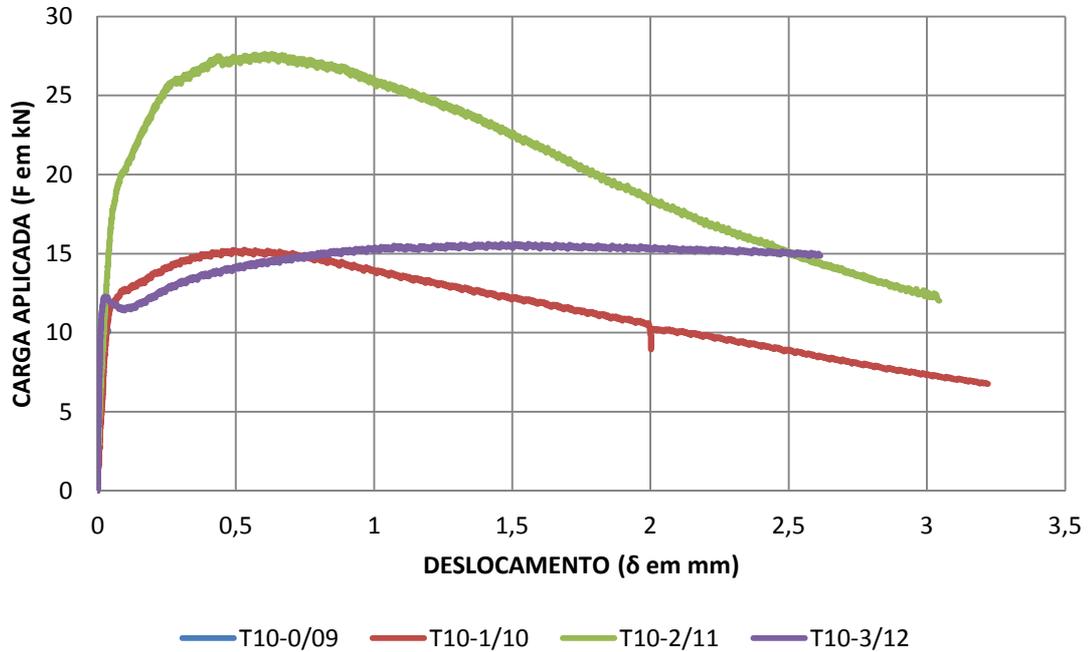
O compósito T05-1/06 apresentou uma elevada resistência mesmo após a fissura, obtendo um grande ganho de resistência ao longo do seu carregamento, então, o material apresentou ductilidade, pois as fibras colaboraram com o ganho de energia; O compósito T05-2/07, por sua vez, apresentou uma resistência moderada, abaixo do traço T05-1/06, mas após o fissuramento continuou conservando energia e resistindo ao carregamento, apresentando ductilidade;

T05-3/08: O material apresentou uma elevada resistência, afinal, continuou ganhando-a mesmo após o fissuramento. Pela sua curva suave, percebe-se que o material demonstrou uma ótima ductilidade, mas sem muitos ganhos de resistência ao longo do carregamento. Os traços T05 com 5% de sílica tiveram um comportamento similar, com pouca variação em sua resistência ao carregamento, independentemente da variação da porcentagem de fibra.

5.2.2.3 Traços de CDRF com adição de 10% de sílica:

Figura 5.21 - Compósito com 10% de sílica ativa

GRÁFICO FORÇA x DESLOCAMENTO VERTICAL (F x δ)



Fonte: Autor

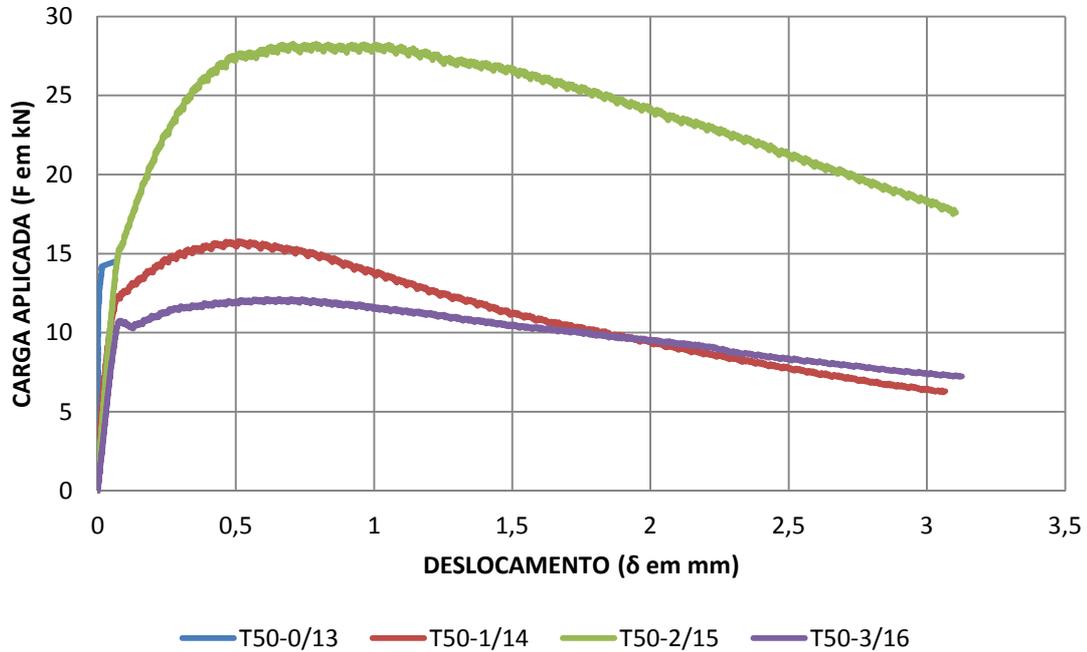
No gráfico da figura 5.21, o compósito T10-0/09 apresentou uma baixa resistência. Mesmo com uma dosagem de 10% de sílica, rompeu-se facilmente após a adição da carga máxima. Ou seja, a sílica não contribuiu para a resistência à flexão do compósito. Em relação aos compósitos com adição de fibra, o compósito T10-1/10 demonstrou baixa resistência até o fissuramento, contudo, ganhou resistência ao longo do carregamento, apresentando baixa ductilidade em relação ao compósito T10-2/11. Este, apresentou elevada resistência até o fissuramento, e ganhou muita energia, isto é, elevou sua resistência mesmo após o fissuramento e ao longo de seu carregamento também. Portanto, este material apresentou uma excelente ductilidade devido à grande conservação de energia promovida pelas fibras.

O compósito T10-3/12, apresentou uma baixa resistência até seu fissuramento. Após o mesmo, obteve uma pequena perda de energia, porém, as fibras absorveram a energia do carregamento, promovendo ao longo do carregamento um aumento em sua resistência até o final do ciclo, elevando sua resistência residual. Pode-se dizer que este compósito apresentou um fissuramento controlado dando-lhe a ductilidade esperada.

5.2.2.4 Traços de CDRF com adição de 50% de sílica (figura 5.20):

Figura 5.22 - Compósito com 50% de sílica ativa

GRÁFICO FORÇA x DESLOCAMENTO VERTICAL (F x δ)



Fonte: Autor

Dentre os compósitos com adição de 50% de sílica constante na figura 5.22, o T50-0/13 apresentou uma elevada resistência, mas sua ruptura se manteve frágil.

O compósito T50-1/14, por sua vez, demonstrou baixa resistência tanto durante quanto após o carregamento, o que ocasionou perdas após o mesmo. Ou seja, este compósito também foi caracterizado como de baixa ductilidade. O compósito T50-2/15 conseguiu um ótimo desempenho. Observando a curva de leve inclinação após o fissuramento, fica evidente seu excelente controle de fissura, bem como o ganho em resistência durante o carregamento, o que lhe confere a ductilidade esperada. Pode-se dizer que esse material adquiriu maior resistência devido às dosagens de sílica (50%) no traço. Estes resultados apontam que uma matriz densa promove melhor desempenho no travamento das fibras.

O compósito T50-3/16 adquiriu comportamento atípico em relação aos demais compósitos. O material mostrou-se de baixa resistência, e demonstrou ganhos apenas após o fissuramento, mantendo sua energia ao longo do carregamento. —O material é dúctil, porém não é recomendável a utilização de uma dosagem acima de 3% de fibra para traços com elevada concentração de sílica.

6 CONCLUSÃO

Por meio deste estudo, conclui-se que as fibras de polipropileno colaboraram para o aumento da ductilidade e controle de fissuramento do compósito cimentício analisado. A sílica ativa em altas dosagens, entretanto, não colabora com as resistências do compósito, pois provoca travamento das fibras, resultado prejudicial à sua ductilidade.

O compósito estudado melhorou suas propriedades quanto aos esforços de tração na flexão, contudo, é importante salientar que reduziu-se consideravelmente a resistência à compressão e o módulo de elasticidade com a adição da fibra. Então, o compósito pode colaborar para a durabilidade das estruturas de concreto.

Recomenda-se, para futuros estudos, a análise do compósito com adições de sílica entre 10% e 15% para se obter um bom resultado tanto nos esforços à compressão, quanto nos de tração na flexão, analisando a colaboração da sílica para a tenacidade da fibra e para continuidade dos trabalhos de aplicação do compósito em estruturas de concreto pré-moldado, lajes, pisos, pilares e substratos para reforços estruturais.

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AİTCIN, P.-C. Cements of Yesterday and Today Concrete of Tomorrow. **Cement and Concrete Research**, Sherbrooke, 30, 2000. 1349-1359.

AİTCIN, P.-C. **Concreto de Alto Desempenho**. Tradução de Geraldo G. Serra. 1. ed. São Paulo: PINI, 2000. 695 p

ALMEIDA, I. R.. **Betões de alta resistência e durabilidade. Composição e características**. Tese de Doutorado. Universidade Técnica de Lisboa, 1990.

AL-TAMIMI, A. **Fibre-reinforced connections in precast concrete flat slabs**. University of Nottingham. [S.l.]. 2001.

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. **ACI 363R-92** (Reapproved 1997) State-of-the-art report on high strength concrete. ACI Manual of Concrete Practice 2005. ACI, Detroit (USA), 2005. 55 p.

ARAÚJO, J., MORAIS, A. O., COSTA, E. B. C., GEYER, A. Análise da Influência de Diferentes Tipos de Sílica Ativa na Produção de Concretos de Alto Desempenho. **Anais do 48º Congresso Brasileiro do Concreto**. Rio de Janeiro: IBRACON, 2006.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7211**: Agregados para concreto - Especificação. Rio de Janeiro, 2005.

_____. **NBR 11768**: Aditivos químicos para concreto de cimento Portland – Requisitos. Rio de Janeiro, 2011.

_____. **NBR 5733**: Cimento Portland de alta resistência inicial. Rio de Janeiro, 1991.

_____. **NBR 13956**: Sílica ativa para uso em cimento Portland, concreto, argamassa e pasta de cimento Portland – Especificação. Rio de Janeiro, 1997.

_____. **NBR NM 248**: Agregados - Determinação da composição granulométrica – Especificação. Rio de Janeiro, 2003

_____. **NBR NM 52**: Agregado miúdo - Determinação da massa específica e massa específica aparente. Rio de Janeiro, 2009

_____. **NBR 5738**: Moldagem e cura de corpos-de-prova cilíndricos ou prismáticos de concreto. Rio de Janeiro, 1994.

_____. **NBR 5739**: Concreto: ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2007.

_____. **NBR 8522**: Concreto – Determinação dos módulos estáticos de elasticidade e de deformação e da curva tensão-deformação. Rio de Janeiro, 2008.

_____. **NBR 6118**: Projeto de estruturas de concreto – Procedimento. Rio de Janeiro, 2014.

_____. **NBR 7681-2: Calda de cimento para injeção Parte 2: Determinação do índice de fluidez e da vida útil — Método de ensaio.** Rio de Janeiro, 2014.

BACCIN, A. G. C. **Fundamentos do Concreto de Alto Desempenho e sua Aplicação no Projeto de Pilares.** Dissertação (Mestrado). São Carlos, 1998. Universidade de São Paulo, Escola de Engenharia de São Carlos.

BALAGURU, P. N.; SHAH, S. P. (1992). Fiber reinforced cement composites. **McGraw-Hill International Editions**, New York.

BARCELLOS, E. **Braskem bate recorde de produção de polipropileno.** Revista Exame, 2012. Disponível em: <<http://exame.abril.com.br/negocios/noticias/braskem-bate-recorde-de-producao-de-polipropileno-2>>. Acesso em: 16 abril 2016.

BARATA, M. S. **Concreto de alto desempenho no estado do Pará: Estudo de viabilidade técnica e econômica de produção de concreto de alto desempenho com os materiais disponíveis em Belém e através do emprego de adições de sílica ativa e metacaulim.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 1998.

BASILIO, E. Santos. **Agregados para concreto.** ET 41, ABCP 1995.

BISPO, L. C. A. **Estudo sobre compatibilidade entre cimento portland composto e aditivos superplastificantes.** Universidade Estadual de Feira de Santana. 2009.

BAUER, L. Falcão, **Materiais de construção** 5ª edição, Livros Técnicos e Científicos Editora. São Paulo, 1995.

CALLISTER, W.D. **Ciência e engenharia de materiais: uma introdução.** 5. ed., Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos, 2002.

CASAGRANDE, M. D. T. **Estudo do comportamento de um solo reforçado com fibras de visiando o uso como base para fundações superficiais.** Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre. 2001.

CONCREMIX. Notícias: **Aditivos plastificantes.** Disponível em: <<http://www.concremix.com.br/noticias/aditivos-plastificantes.html>> . Acesso em 15 mar. 2015.

DAL MOLIN, D. C. C. **Contribuição ao estudo das propriedades mecânicas dos concretos de alta resistência com e sem adição de microsílica.** Tese (Doutorado em Engenharia) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo. 1995

DIPROTEC Produtos Técnicos para Construção. **ADITIVOS.** Disponível em: <<http://www.diprotec.com.br/nossa-linha/aditivos>>. Acesso em 15 mar. 2015.

DOMONE, P.; SOUTSOS, M. An approach to the proportioning of high-strength concrete mixes. **Concrete International.** V. 16, 1994. p. 26 a 31.

DUVAL, R., KADRI, E.H. Influence of silica fume on the workability and the compressive strength of high-performance concretes. **Cement and Concrete Research** V. 28, 1998.

EBEWELE, R.O. **Polymer Science and Technology**. Nigeria: CRC press LLC, 1996.

FERRARI, V. J. **Reforço à flexão de vigas de concreto armado com manta de polímero reforçado com fibras de carbono (PRFC) aderido a substrato de transição constituído por compósito cimentício de alto desempenho**. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2007.

FIGUEIREDO, A. D., **Concreto reforçado com fibras**, Tese de Livre-Docência, Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, SP, 2011.

GARCEZ, E. O. **Investigação do Comportamento de Engineered Cementitious Composites Reforçados com Fibras de Polipropileno como Material para Recapeamento de Pavimentos**. UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL. Porto Alegre, p. 176. 2009.

GRACE BRASIL LTDA. **CATÁLOGO TÉCNICO: TEC FLOW** Aditivo superplastificante para concreto, 2015.

GUTIÉRREZ, P. A.; CÁNOVAS, M. F.. “High performance concrete: requirements for constituent materials and mix proportioning”. **ACI Materials Journal**, v.93, nº3, p.233-241, 1996.

HOFFMANN, A. T. **Influência da adição de sílica ativa, relação água/aglomerante, temperatura e tempo de cura no coeficiente de difusão de cloretos em concretos**. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre. 2001.

Li, V. C., On Engineered Cementitious composites (ECC) – A Review of the Material and Its Applications. **Journal of Advanced Concrete Technology**, v. 1, n. 3, pp. 215 – 230, Nov. 2003.

MACAFERRI. **BOLETM TÉCNICO: Fibras FibroMac**. Disponível em:
< <http://www.maccaferri.com/br/produtos/fibras/fibras-fibromac/> >. Acesso em 14 abr. 2015.

MALHOTRA, V. M.; CARRETE, G. G. Silica fume concrete – properties, applications, and limitations. **Concrete International**, v.5, n.5, p. 40-46, May, 1983.

MARK, J. E. **Polymer Data Handbook**. USA: Oxford University Press, 1998.

MELO, K. A. D.; MARTINS, V. D. C.; REPETTE, W. Estudo de compatibilidade cimento-aditivo redutor de água. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 9, n. 1, p. 45 - 56, 2009.

MENDES, S. E. D. S. **Estudo experimental de concreto de alto desempenho utilizando agregados graúdos disponíveis na região metropolitana de Curitiba**. Universidade Federal do Paraná. Curitiba. 2002.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: estrutura, propriedades e materiais**. São Paulo: PINI, 2000. 573 p.

MONTE, R. e FIGUEIREDO, A. D. Avaliação comparativa de métodos de ensaio de fluidez em pastas de cimento com aditivos superplastificantes. In: 46º Congresso Brasileiro do Concreto. **Anais...** Vol. 02, p. 207 – 219, Florianópolis, 2004.

NETTO, R. M. **Materiais pozolânicos**. Escola de Engenharia da UFMG. Belo Horizonte. 2006.

NEVILLE, A. M. **Propriedades do concreto**. 2. ed., São Paulo: Pini, 1997, 828p.

OLIVEIRA, L. A. P; RAMOS, M; GOMES, J. P. C. (2005). Dosagem de concreto auto adensável reforçado com fibras de aço. In: Congresso Brasileiro do Concreto, 47., 2005, Olinda. **Anais...** São Paulo: Instituto Brasileiro do Concreto, p. 568-581.

QIAN, S., **Influence of Concrete Material Ductility on the Behavior of High Stress concentration Zones**, Dissertation, University of Michigan, 2007.

RILEM TC 162-TDF Test and design methods for steel fibre reinforced concrete. Design of steel fibre reinforced concrete using the σ -w method: principles and applications. Materials and Structures/Matériaux et Constructions. 2002.

SALVADOR, R. P. **Análise comparativa de métodos de ensaio para caracterização do comportamento mecânico de concreto reforçado com fibras**. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, p. 178. 2013.

SIGNIFICADOS. **DUCTILIDADE**. Disponível em:
<<http://www.significados.com.br/ductilidade/>>. Acesso em: 22 abr. 2016.

SINIFICADOS. **TENACIDADE**. Disponível em:
<<http://www.significados.com.br/tenacidade/>>. Acesso em: 22 abr. 2016.

TAYLOR, M. R.; LYDON, F. D.; BARR, B. I. G. Mix proportions for high strength concrete. Construction and Building Materials, v. 10, n. 6, p. 445-450, 1996.

THOMAZ, E.C.S. CRF-Concreto Reforçado Com Fibras-Mito e Realidade.**Notas de aula**, 2009.

VANDERLEI, R. D. **Análise experimental do concreto de pós reativos: Dosagem e propriedades mecânicas**. Universidade de São Paulo. São Carlos, p. 168. 2004.

VEDACIT. **Manual Técnico Aditivos para Concretos e Argamassas**. 5ª Edição, 2005, 120 p. Disponível em www.vedacit.com.br. Acesso em junho-agosto 2009.

VELASCO, R. V. **Concreto de alto desempenho reforçado com fibras de polipropileno e sisal submetido a altas temperaturas**. Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro. 2002.

VIEIRA, S. R. S. S.; REGATTIERI, C. E. X. Cimento-aditivo: determinação de teores ótimos e estudos de compatibilidade. In: Jornadas Sul-Americanas de Engenharia Estrutural, XXVIII, **Anais...** v. 5, 1997. p. 1927-1936.

VIEIRA, F. P., KULAKOWSKI, M. P., DAL MOLIN, D. C. C., VILELA, A. C. F. Estudos de durabilidade em concretos e argamassas com adição de microssílica. In: Workshop Durabilidade Das Construções, 1997, São Leopoldo. **Anais**. São Leopoldo : UNISINOS - ANTAC, 1997. v. 1. p. 107-116.

YOGENDRAN, V. et al. Silica fume in high-strength concrete. **ACI Materials Journal**, Detroit, v. 84, n. 2, p. 124-129, Mar./Apr. 1987.

APÊNDICE A - Determinação do fator sp/c

A relação sp/c ótima foi determinada pelo ensaio do funil de Marsh adaptada da NBR 7681-2 (2013)

Para todas as etapas descritas, foi necessário nivelar e limpar adequadamente os dispositivos e acessórios utilizados. A relação a/c foi obtida com base na NBR 6118(2014) adotando o valor de 0,6

Determinação do fator sp/c com sílica ativa

1. Preparar uma amostra de pelo menos 1,2 litros de pasta no misturador mecânico para submeter ao escoamento no Funil de Marsh;

2. Para a determinação da relação a/c ótima foram fixados os valores de sp/c em 0,6%, 0,8%, 1,0 e 1,2%;

3. Para tanto, utilizou-se os seguintes materiais: 1500g de cimento, 15g de superplastificante (sp/c de 0,01) , 750g de sílica ativa (sc/c de 0,5) e água, quantificada de acordo com o fator a/c adotado.

Aparelhagem utilizada

- Cone de Marsh – Metálico – Figura 3.3;
- Suporte de apoio para o cone de Marsh – Figura 3.3;
- Proveta de 1000,00ml;
- Béquer de 100,00ml;
- Béquer de 1000,00ml;
- Espátula;
- Cronômetro.

Determinação da dosagem ótima de sp/c para cada faixa de mc/c

Com a determinação do valor inicial de a/c, é possível experimentar as proporções de sp/c para cada faixa de f/c. Para todas as etapas descritas, foi necessário nivelar e limpar adequadamente os dispositivos e acessórios utilizados. Para determinação das relações sp/c e f/c foi adotada a seguinte metodologia de ensaios:

1. Preparar uma amostra de pelos menos 1,2 litros de pasta em um misturador mecânico para submeter ao escoamento no Funil de Marsh;

2. Estabelecer faixas experimentais para relação mc/c. Adotou-se as seguintes relações: 5%; 10% e 50% em massa. Para cada relação de mc/c, experimentou-se relações de sp/c 0,6%, 0,8% e 1,0% e 1,2% em massa. Ao todo, foram realizados 16 experimentos. Na Tabela 9, têm-se os valores para um sp/c de 0,8% e mc/c 5,0%;

3. Materiais: cimento, água quantificada de acordo com o fator a/c adotado, sílica ativa conforme evolução proposta e seu respectivo fator sp/c adotado.—Em seguida, deve-se estabelecer a quantidade de cimento compatível com a capacidade de mistura do equipamento, prevendo a entrada dos outros componentes (sílica ativa, superplastificante e água);

4. Utilizar a quantidade de água determinada pela relação a/c ;

5. Homogeneizar o cimento e o filer no recipiente do misturador por 20s utilizando uma espátula;

6. Adicionar 80% da água e ligar o misturador durante 60s. Adota-se a velocidade lenta do misturador para as etapas de 6 a 11;

7. Parar o processo de mistura e limpar a pasta aderente no recipiente e a pá do misturador com o uso de uma espátula. Esta operação deve ser realizada em até 30s;

8. Ligar novamente o misturador por mais 60s;

9. Realizar novamente a remoção da pasta aderente ao misturador em no máximo 30s;

10. Acrescentar os 20% da água restante juntamente com o superplastificante;

11. Misturar a pasta por mais 2 minutos totalizando assim 5 minutos de preparação;

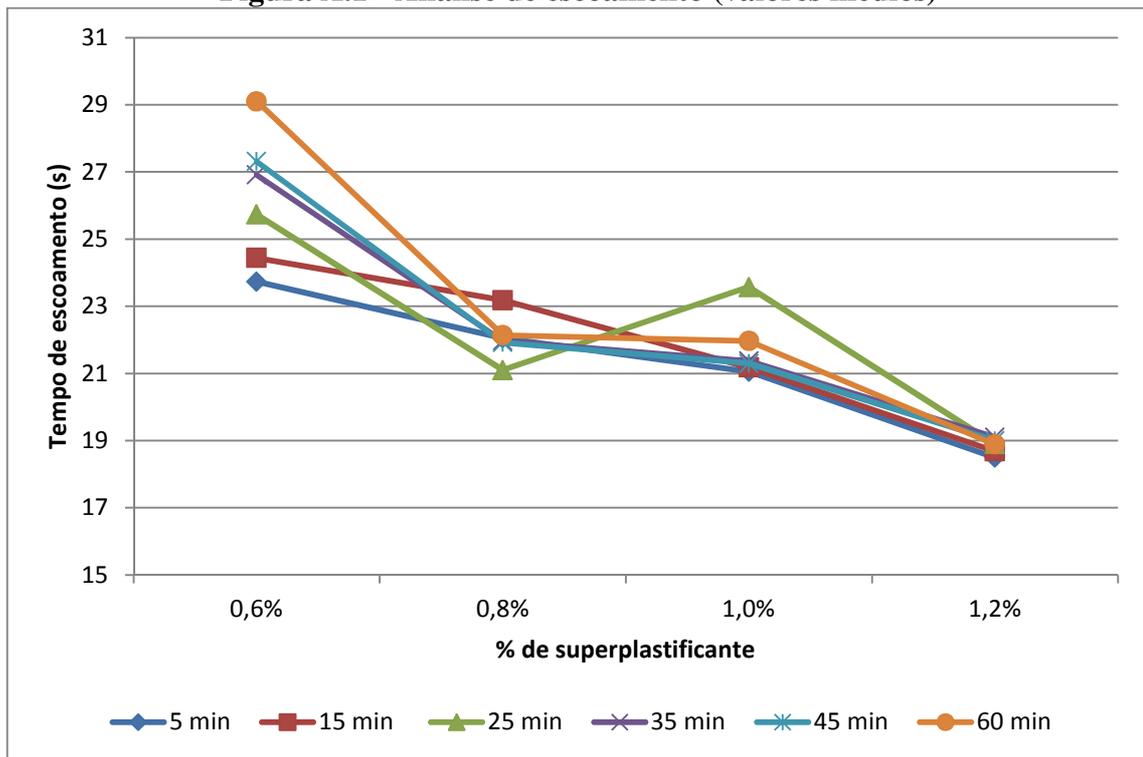
12. Lançar um volume $V = 1,2$ litros da pasta no funil com orifício inferior fechado;

13. Abrir o orifício e medir quanto tempo levará para escoar um volume $v = 1$ litro no béquer posicionado abaixo do funil previamente marcado neste volume;

14. Os procedimentos 12 e 13 são realizados três vezes com o intuito de obter três medidas;

O resultado médio e os valores médios de escoamento em segundos pela taxa de superplastificante da mistura estão especificados no gráfico da Figura A-1.

Através do ensaio, chegou-se ao valor de 0,8% de superplastificante, representado pela análise do método de Aïtcin (2000), como ponto de saturação, valor adotado na dosagem dos compósitos estudados.

Figura A.1 - Análise de escoamento (valores médios)

Fonte: Autor

APÊNDICE B – Gráfico dos ensaios realizados

Na sequência, são apresentados os gráficos dos ensaios realizados para cada grupo de corpos de provas. Os gráficos estão organizados de acordo com a sequência dos traços. O primeiro gráfico apresenta a curva obtida da abertura da fissura pelo clip gauge e o segundo demonstra a curva do deslocamento vertical obtida pelo transdutor de deslocamento.

Figura B.0.1 - Abertura de fissura para o compósito 01 (0% sílica, 0% fibra)

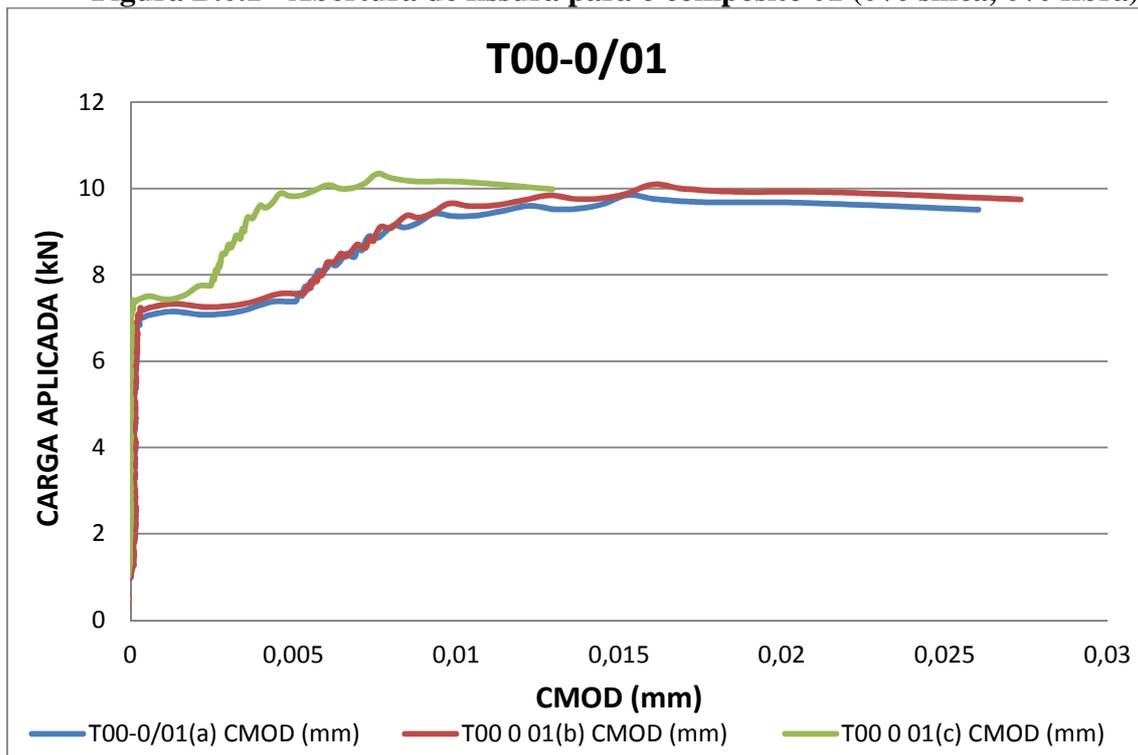


Figura B.0.2 - Deslocamento vertical para o compósito 01 (0% sílica, 0% fibra)

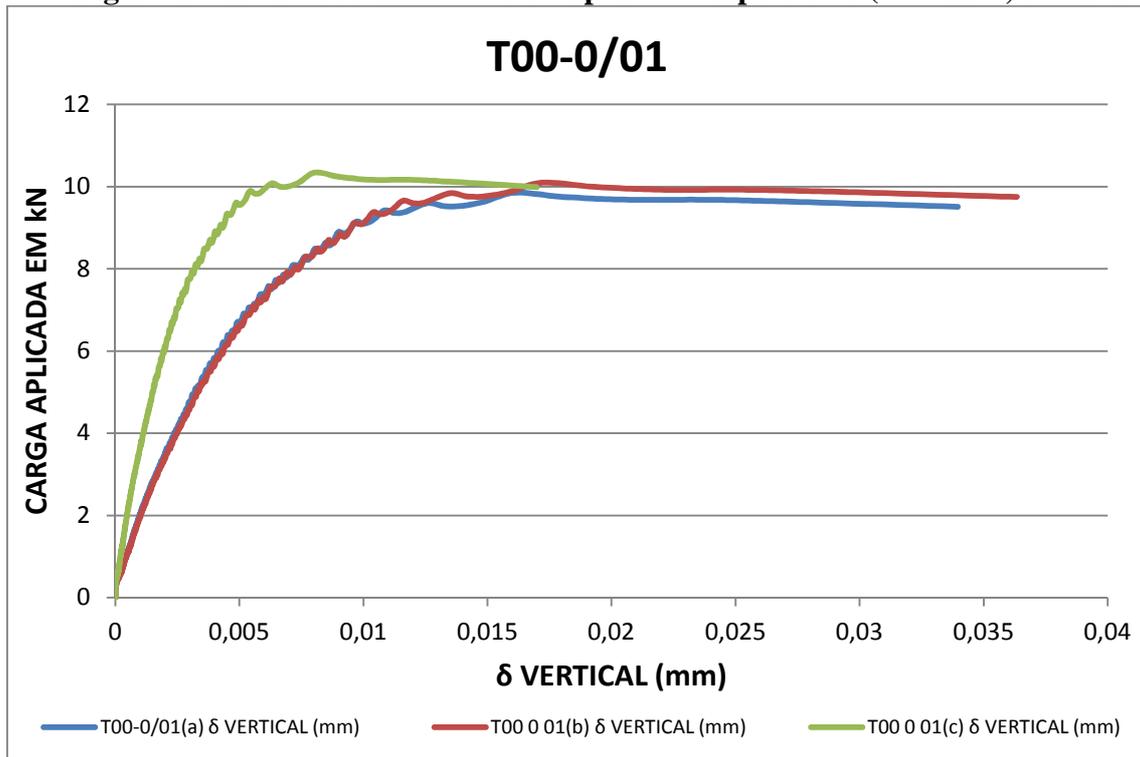


Figura B.0.3 - Abertura de fissura para o compósito 02 (0% sílica, 1% fibra)

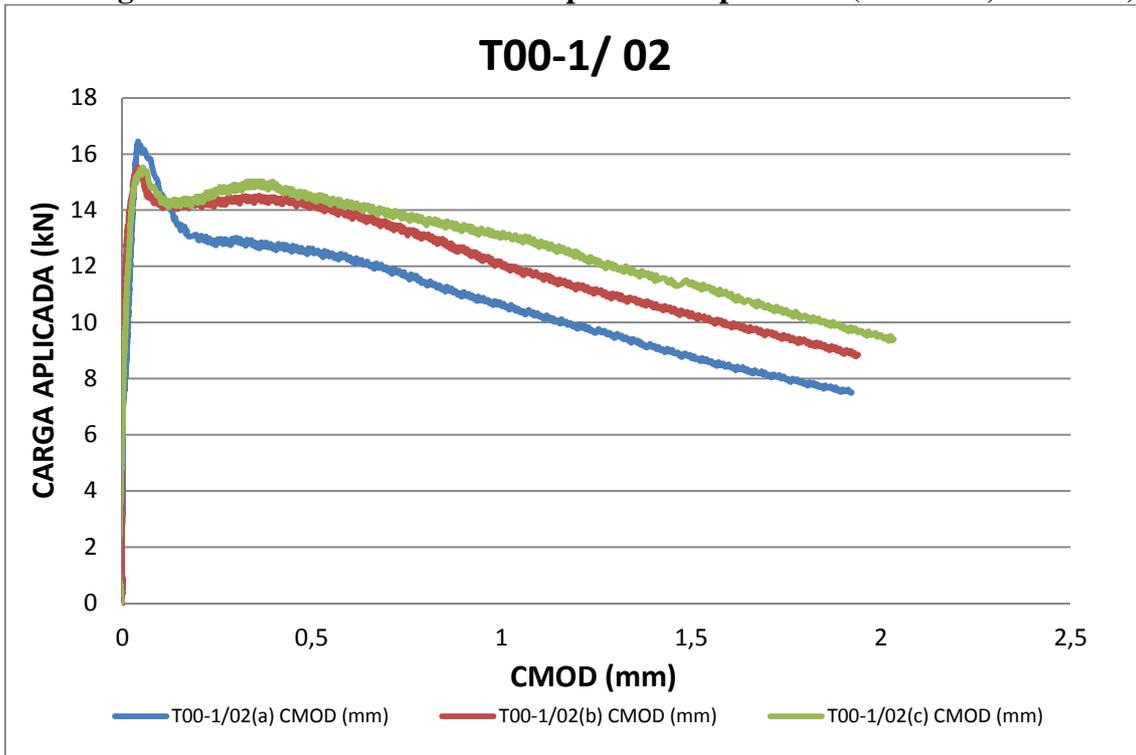


Figura B.0.4 - Deslocamento vertical para o compósito 02 (0% sílica, 1% fibra)

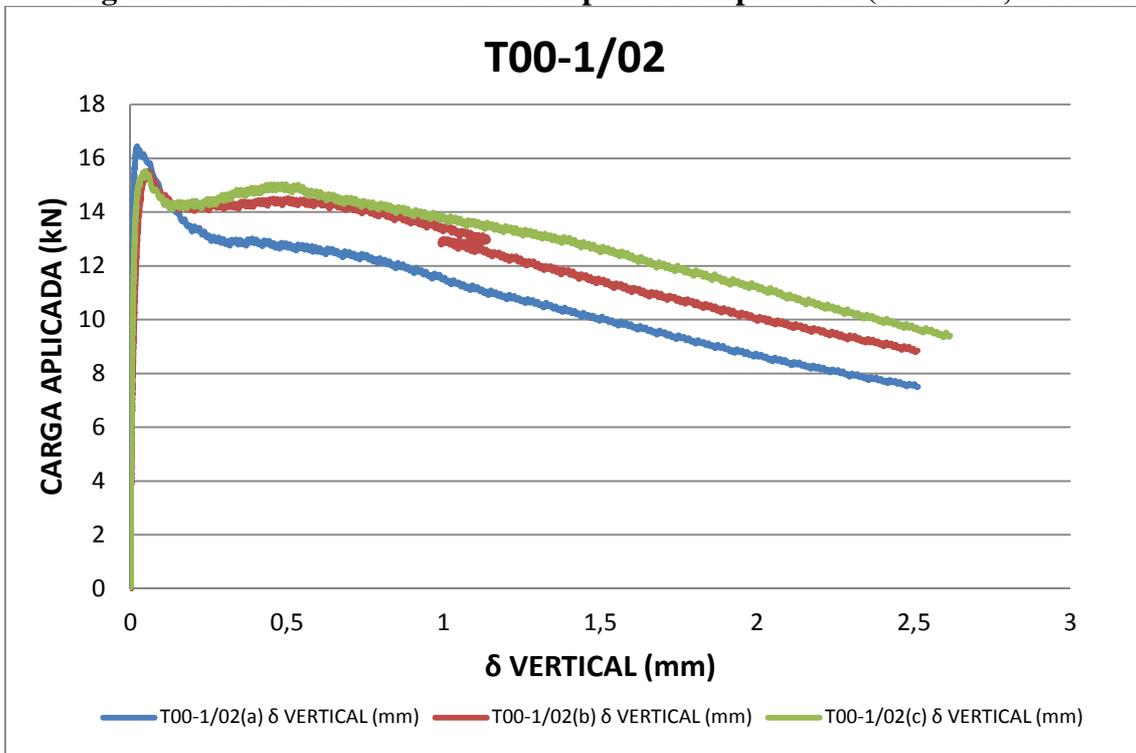


Figura B.0.5 - Abertura de fissura para o compósito 03 (0% sílica, 2% fibra)

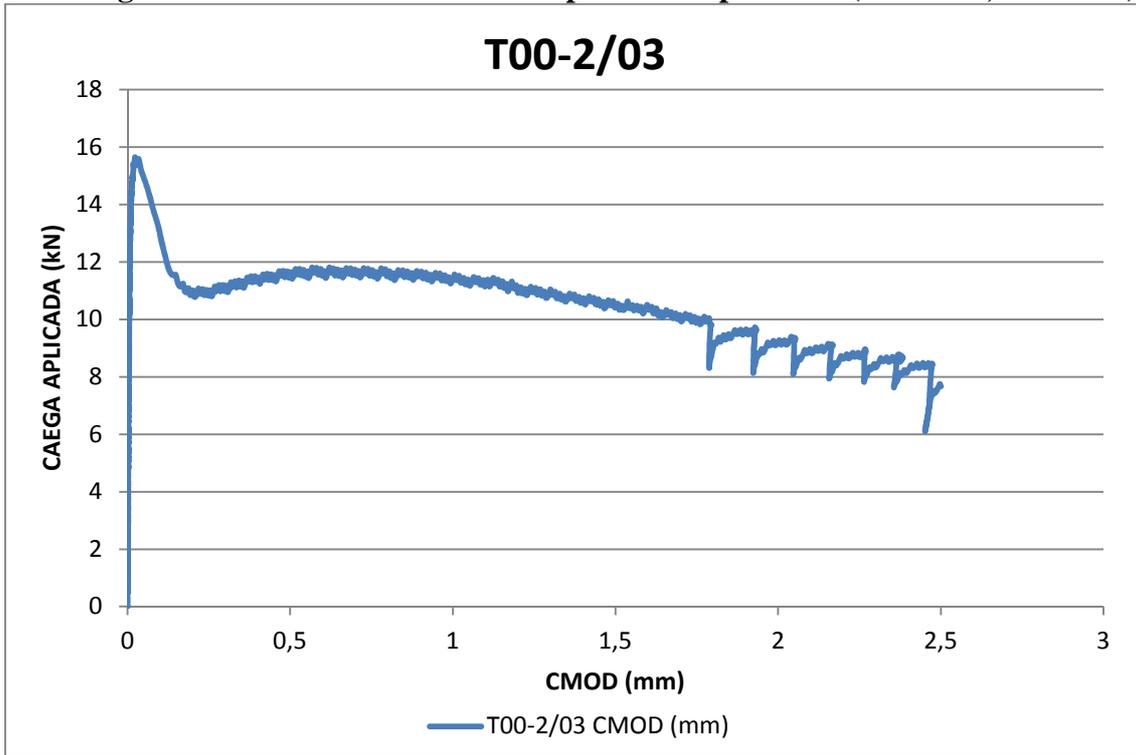


Figura B.0.6 - Deslocamento vertical para o compósito 03 (0% sílica, 2% fibra)

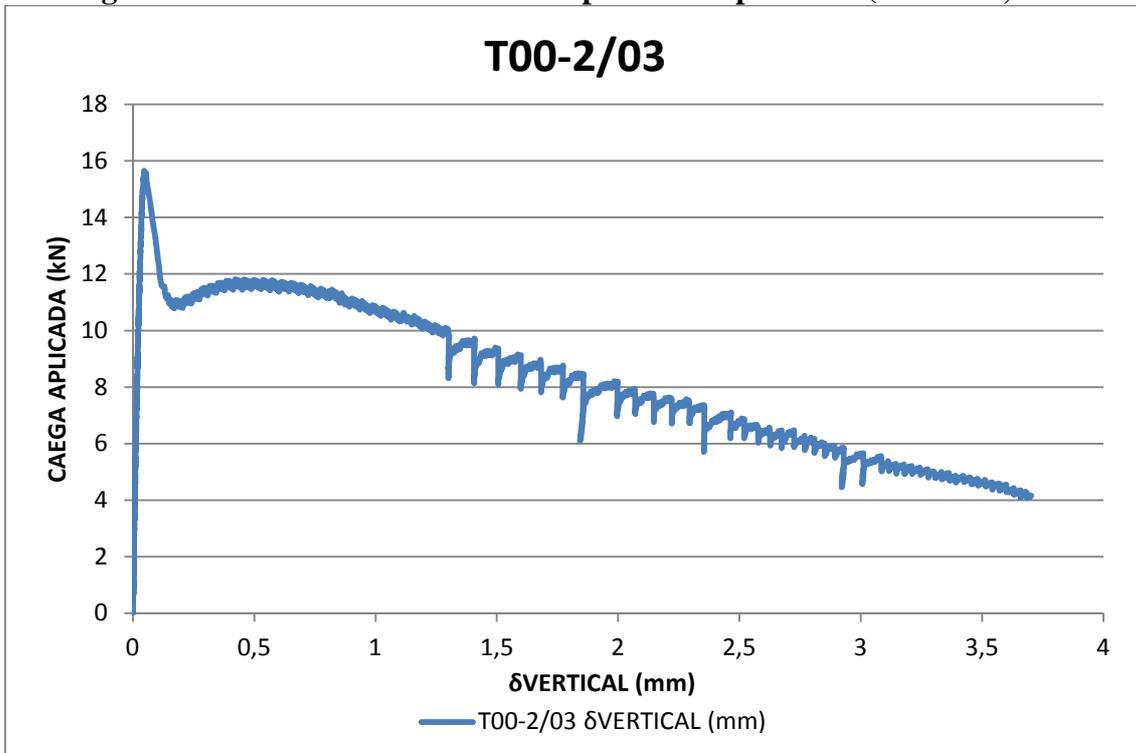


Figura B.0.7 - Abertura de fissura para o compósito 04 (0% sílica, 3% fibra)

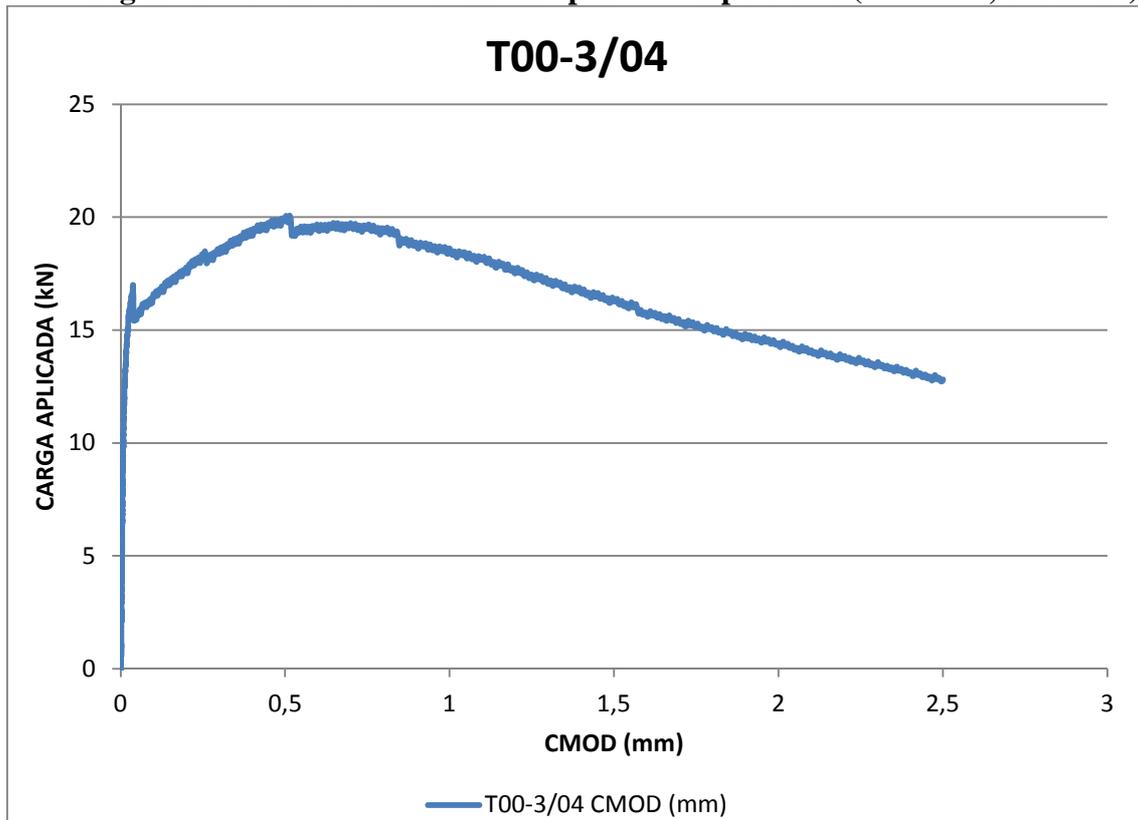


Figura B.0.8 - Deslocamento vertical para o compósito 04 (0% sílica, 3% fibra)

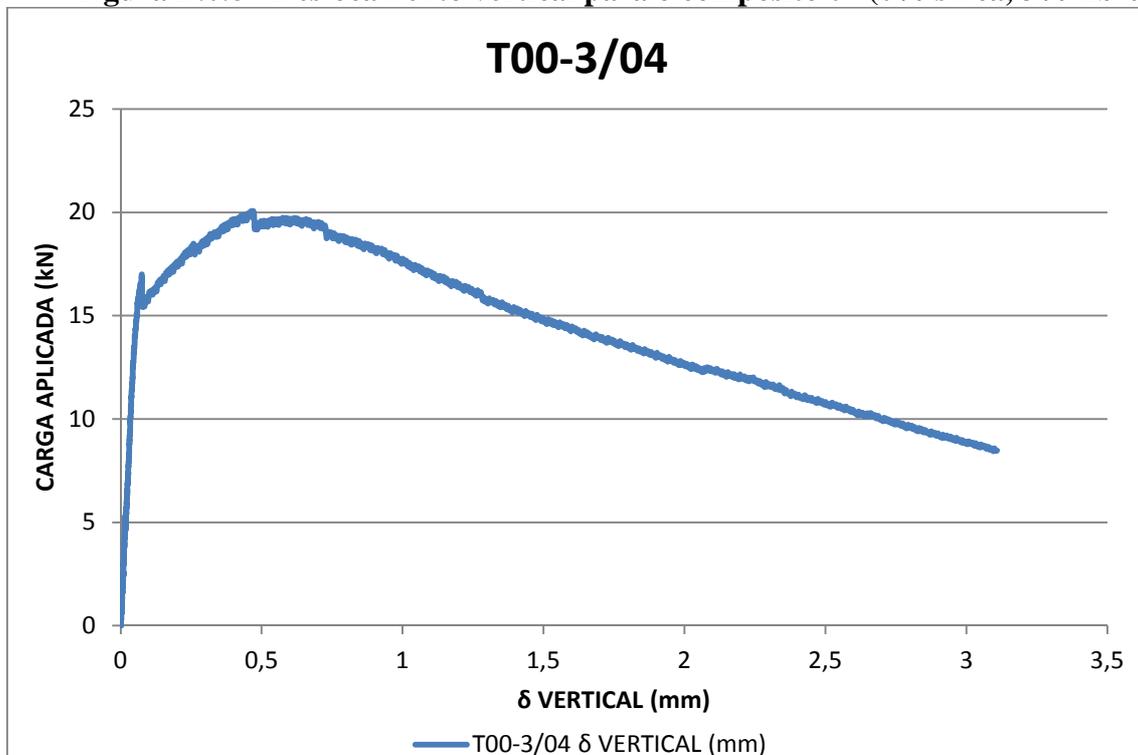


Figura B.0.9 - Abertura de fissura para o compósito 05 (5% sílica, 0% fibra)

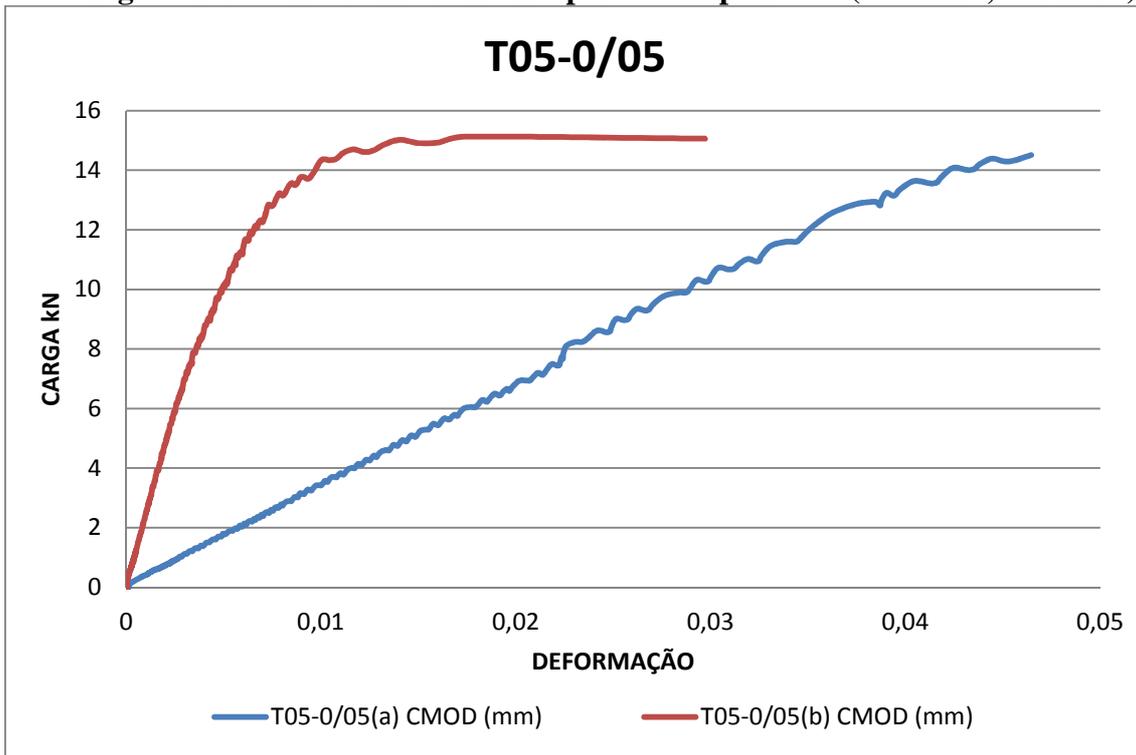


Figura B.0.10 - Deslocamento vertical para o compósito 05 (5% sílica, 0% fibra)

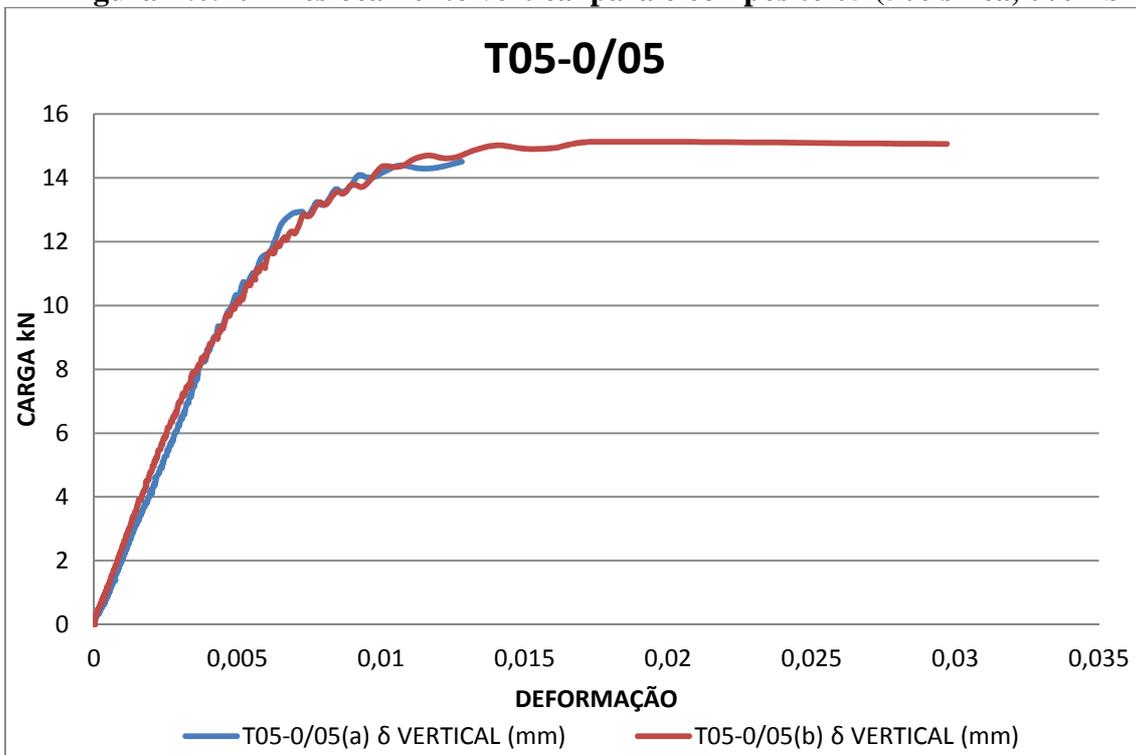


Figura B.0.11 - Abertura de fissura para o compósito 06 (5% sílica, 1% fibra)

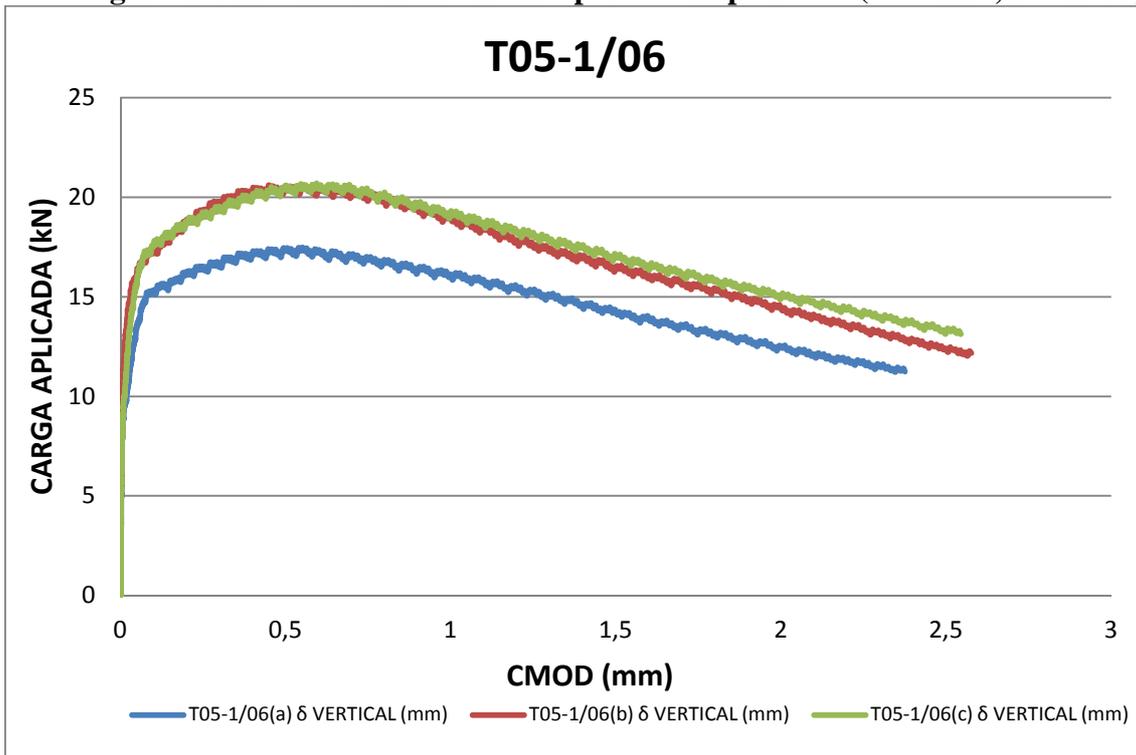


Figura B.0.12 - Deslocamento vertical para o compósito 06 (5% sílica, 1% fibra)

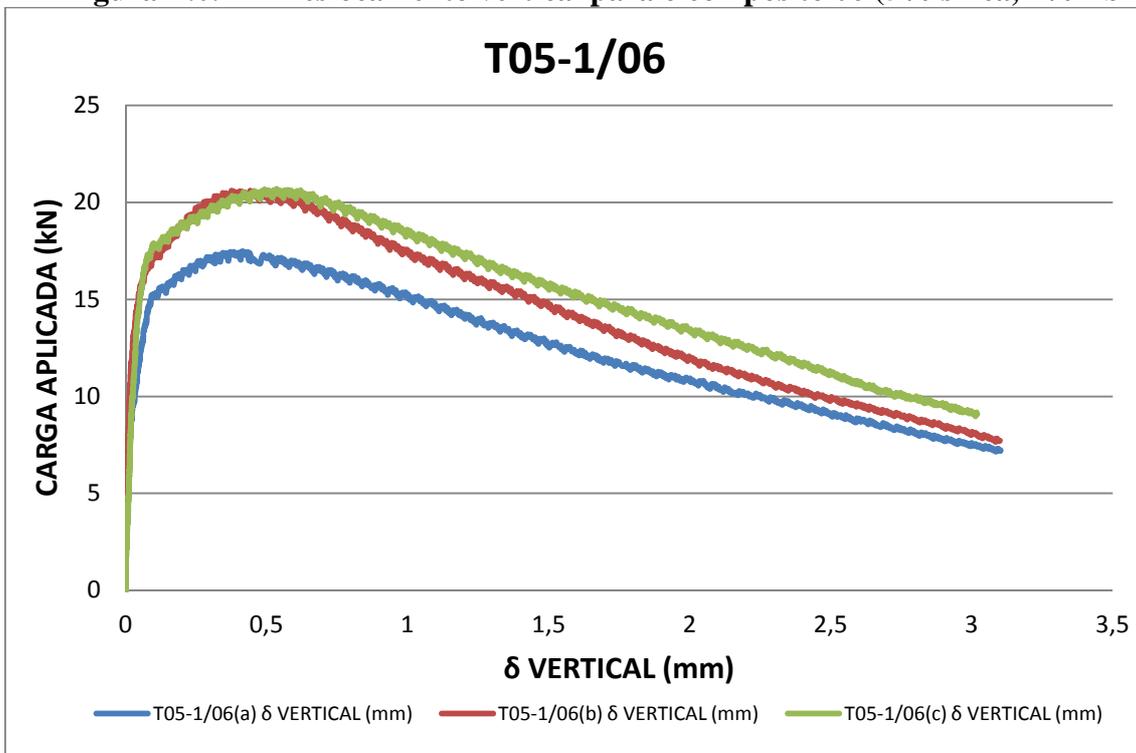


Figura B.0.13 - Abertura de fissura para o compósito 07 (5% sílica, 2% fibra)

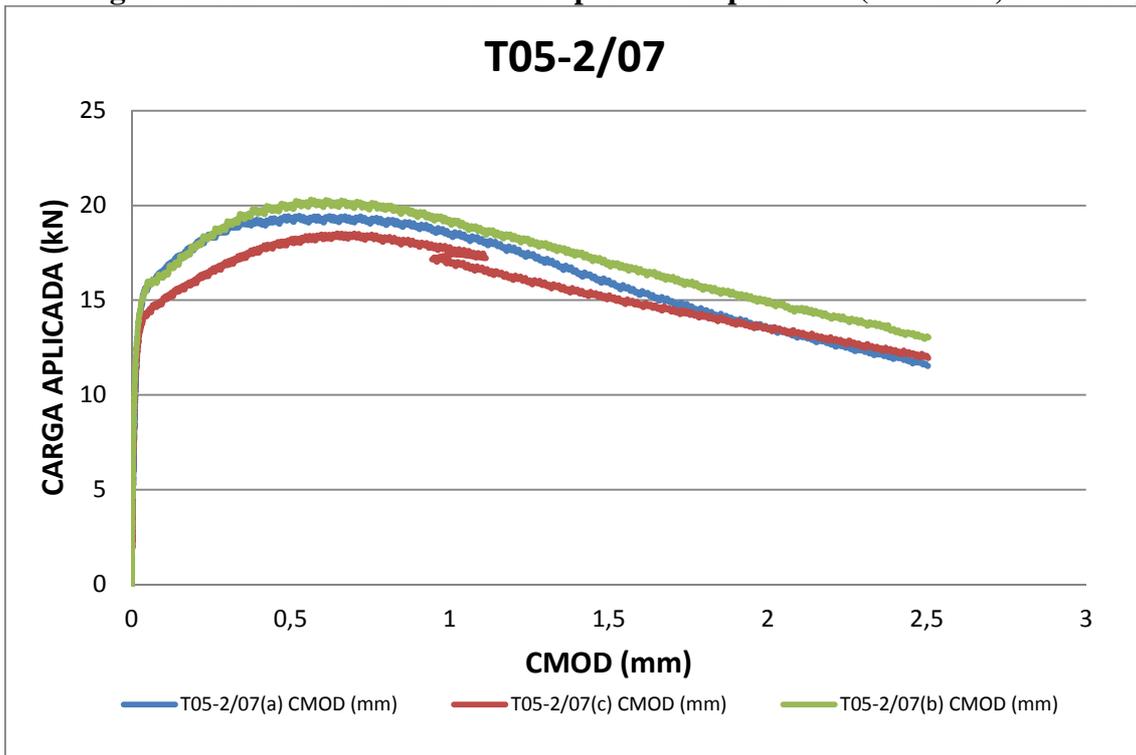


Figura B.0.14 - Deslocamento vertical para o compósito 07 (5% sílica, 2% fibra)

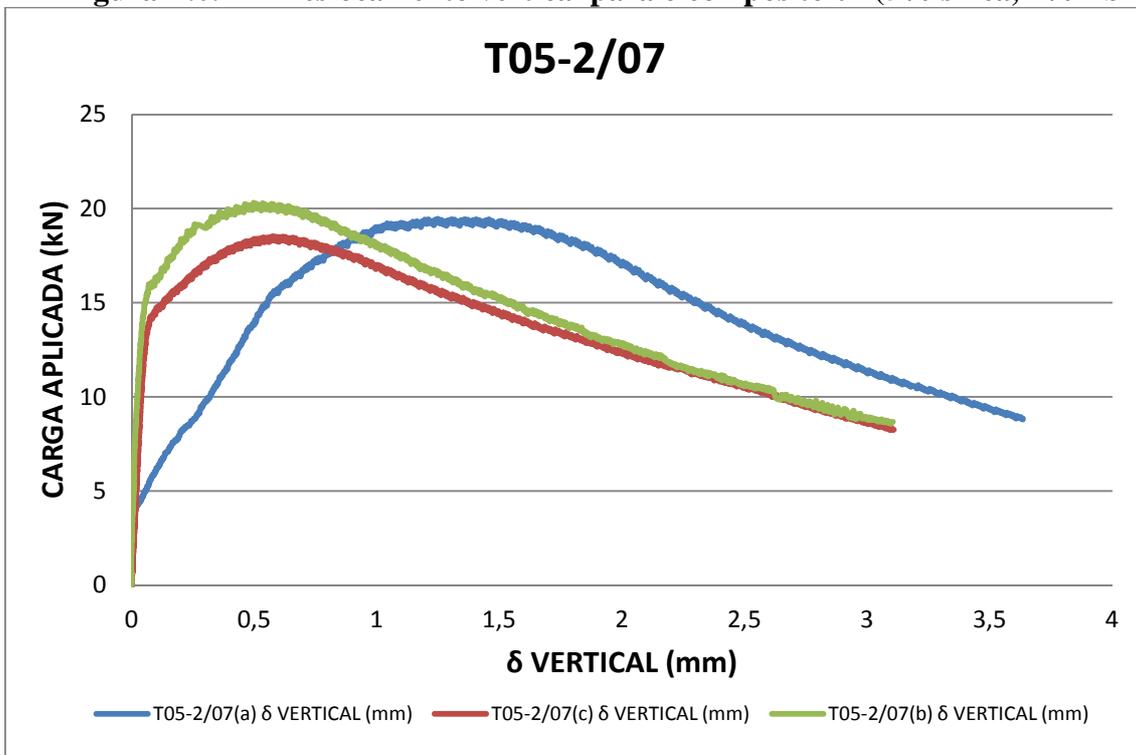


Figura B.0.15 - Abertura de fissura para o compósito 08 (5% sílica, 3% fibra)

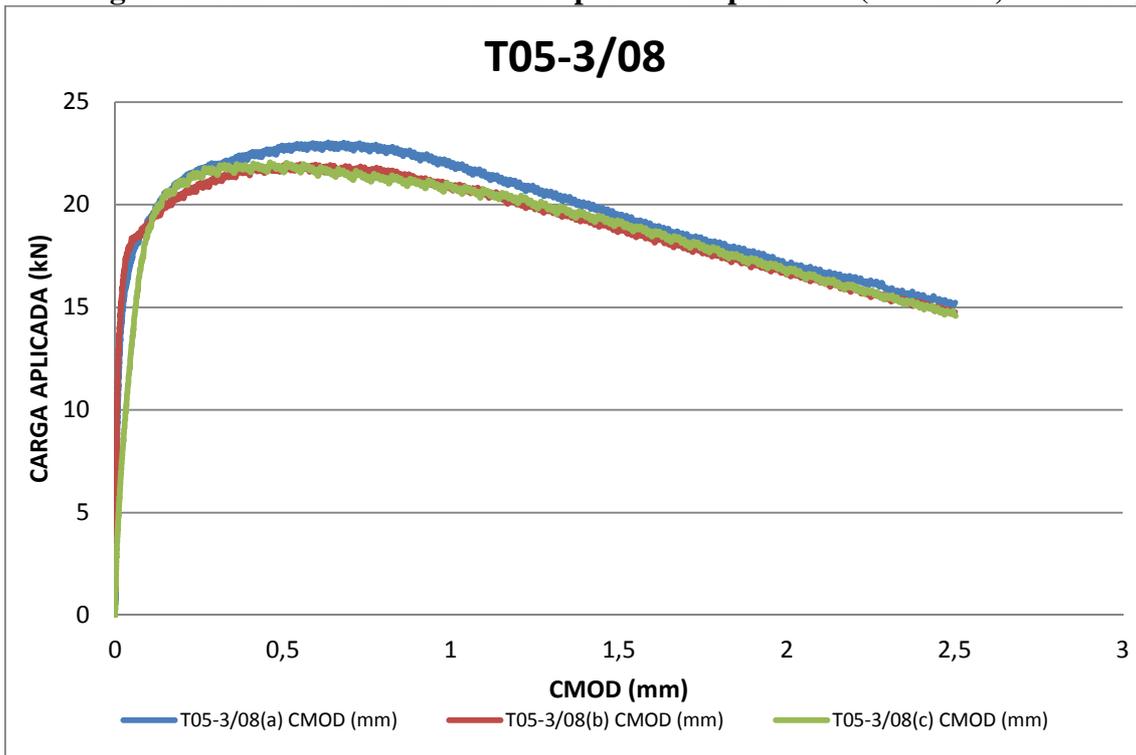


Figura B.0.16 - Deslocamento vertical para o compósito 08 (5% sílica, 3% fibra)

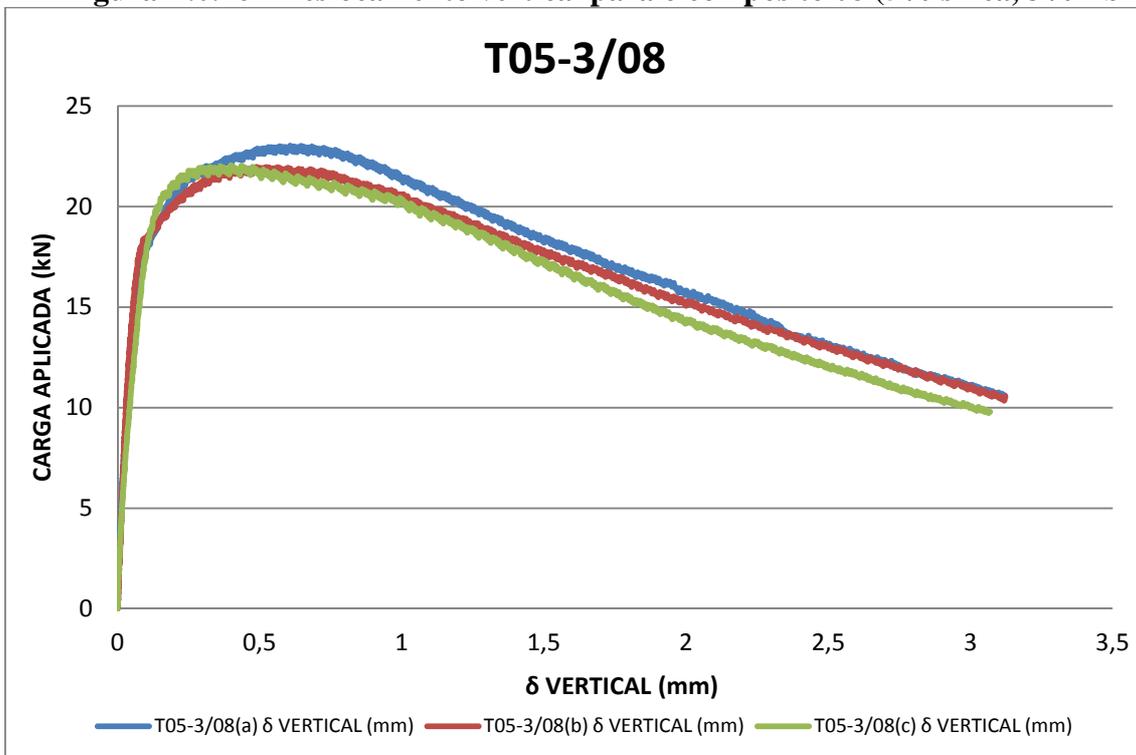


Figura B.0.17 - Abertura de fissura para o compósito 09 (10% sílica, 0% fibra)

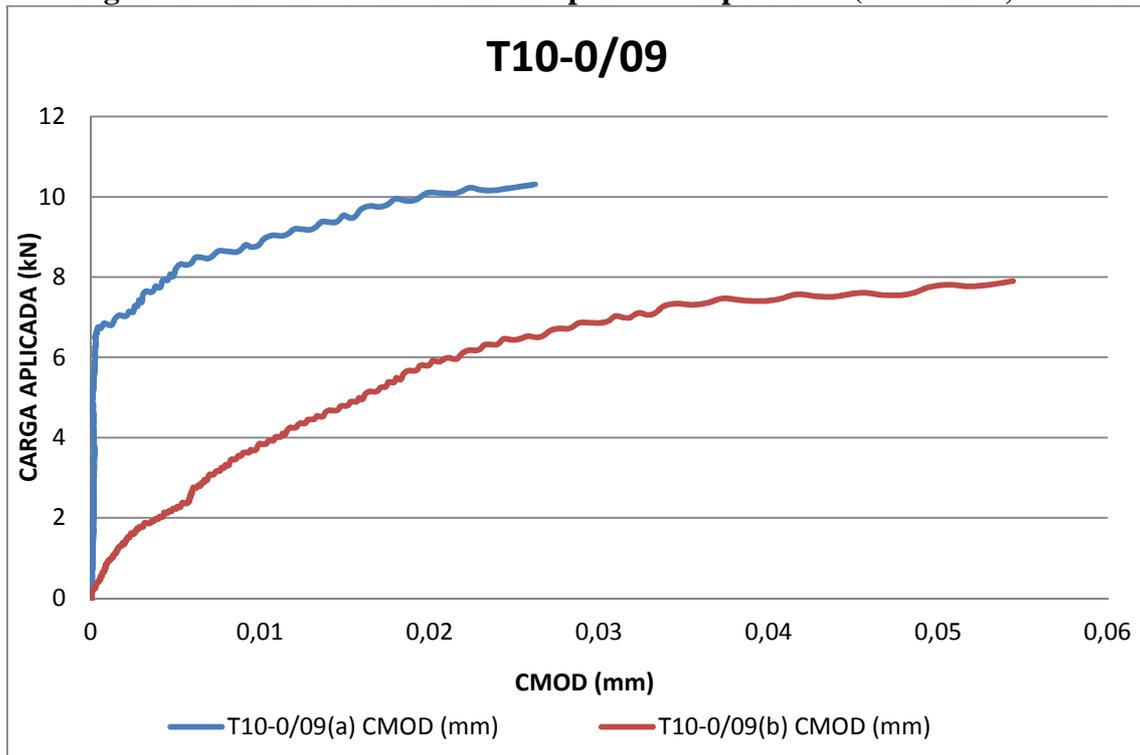


Figura B.0.18 - Deslocamento vertical para o compósito 09 (10% sílica, 0% fibra)

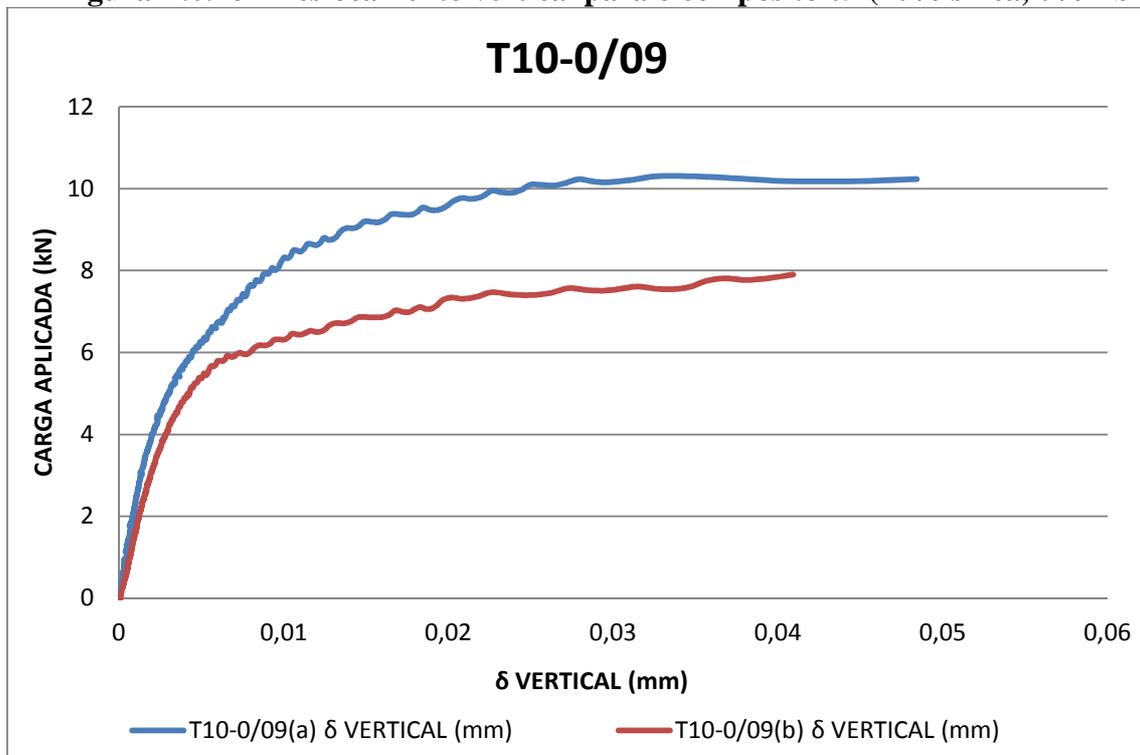


Figura B.0.19 - Abertura de fissura para o compósito 10 (10% sílica, 1% fibra)

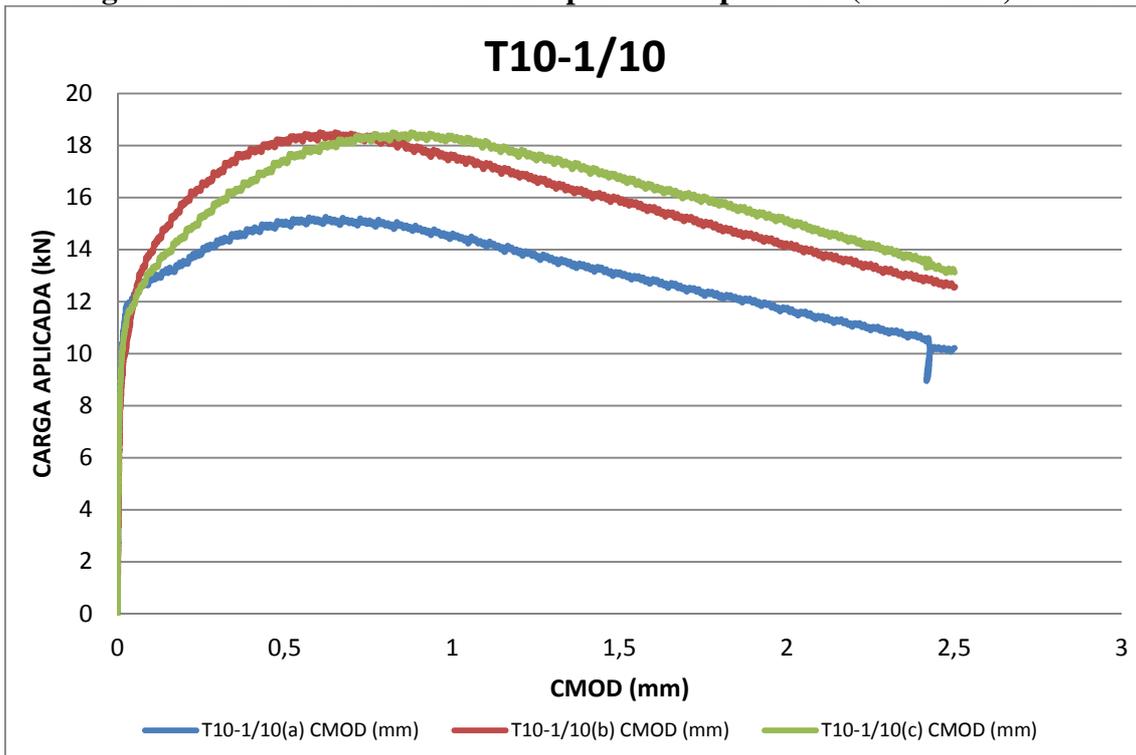


Figura B.0.20 - Deslocamento vertical para o compósito 10 (10% sílica, 1% fibra)

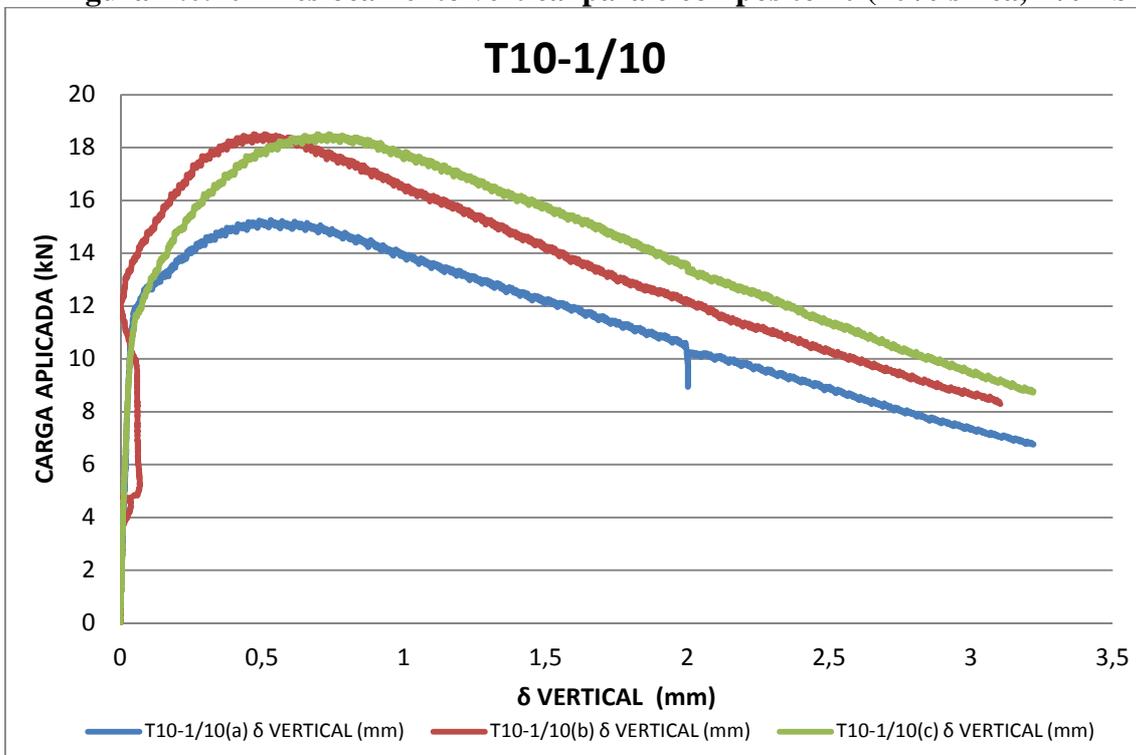


Figura B.0.21 - Abertura de fissura para o compósito 11 (10% sílica, 2% fibra)

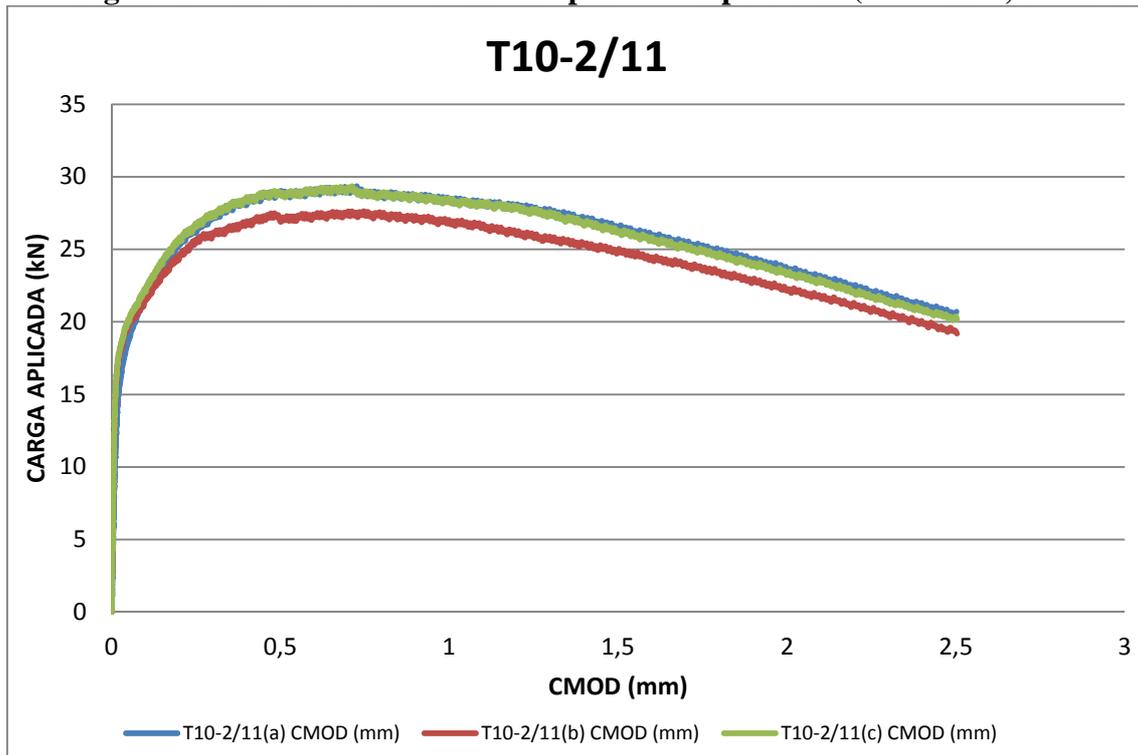


Figura B.0.22 - Deslocamento vertical para o compósito 11 (10% sílica, 2% fibra)

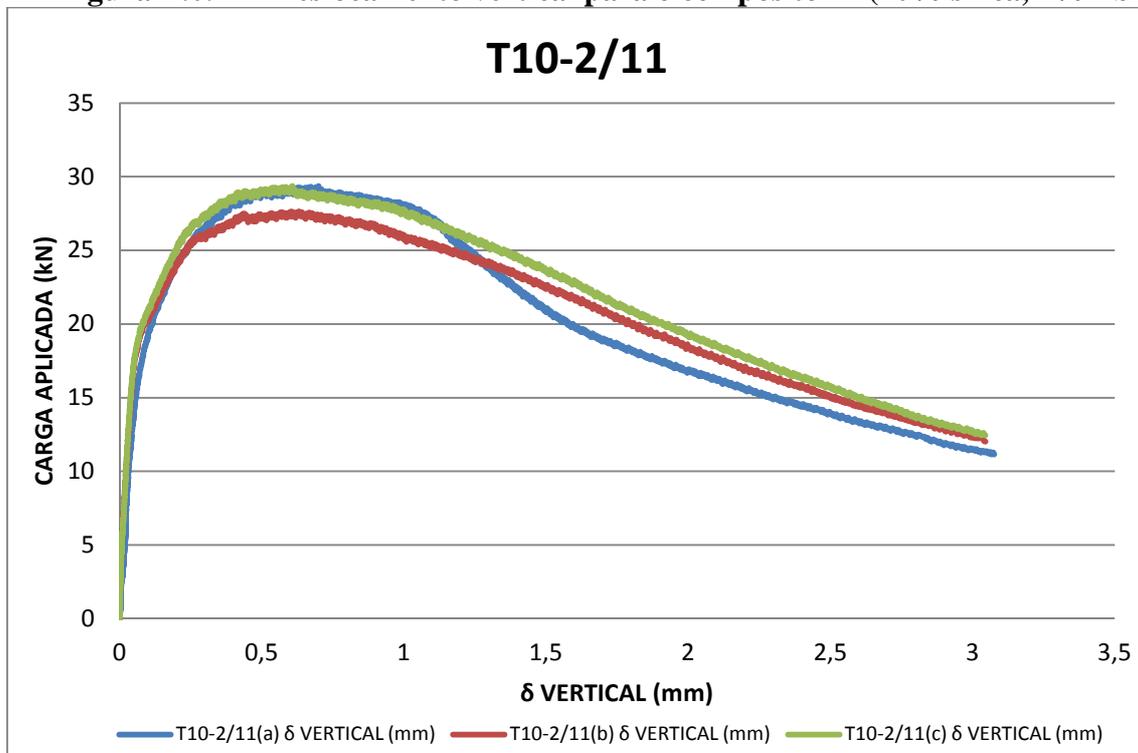


Figura B.0.23 - Abertura de fissura para o compósito 12 (10% sílica, 3% fibra)

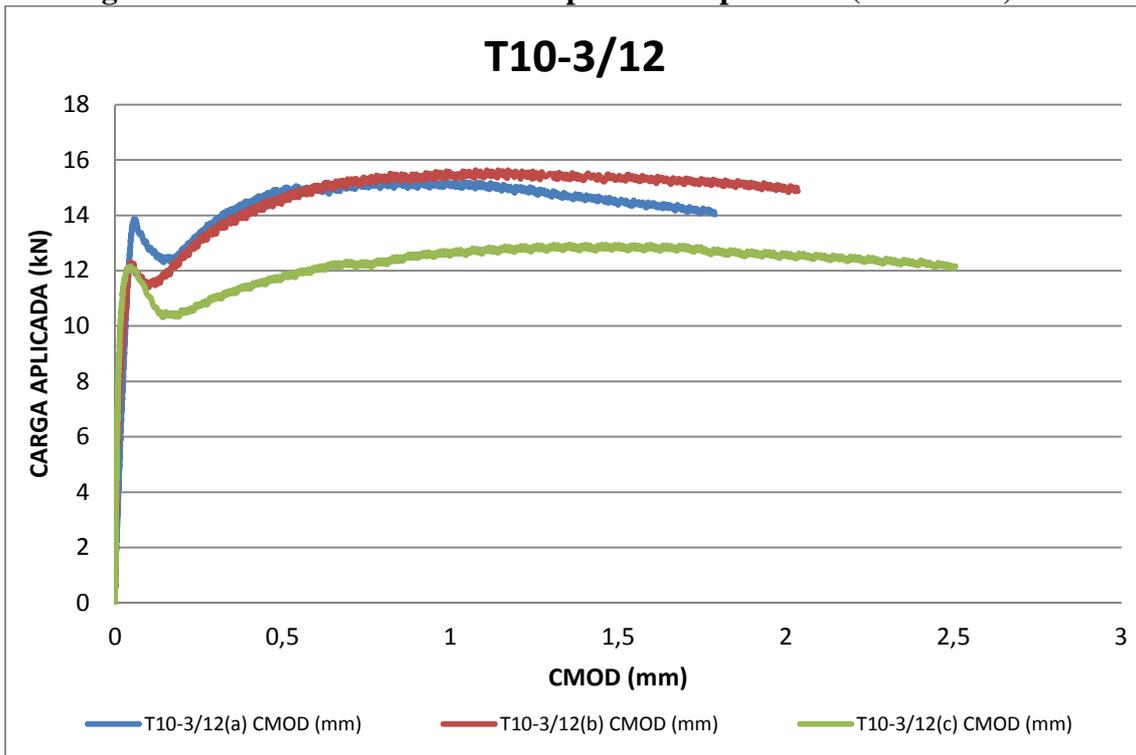


Figura B.0.24 - Deslocamento vertical para o compósito 12 (10% sílica, 3% fibra)

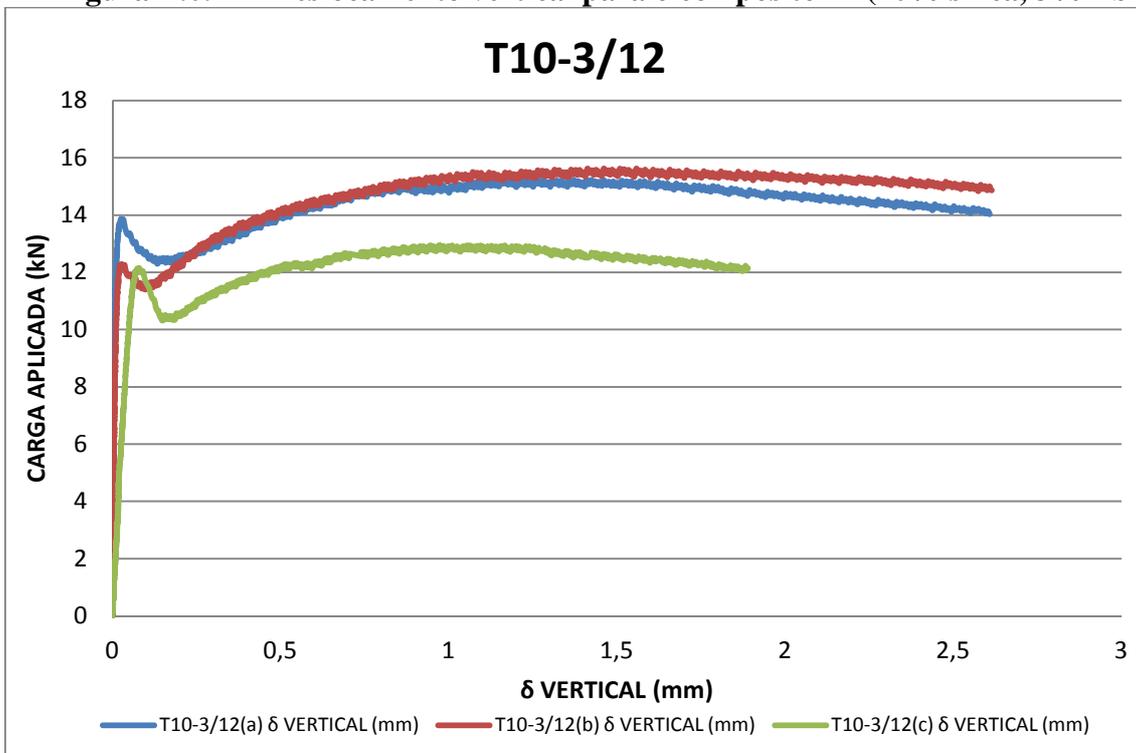


Figura B.0.25 - Abertura de fissura para o compósito 13 (50% sílica, 0% fibra)

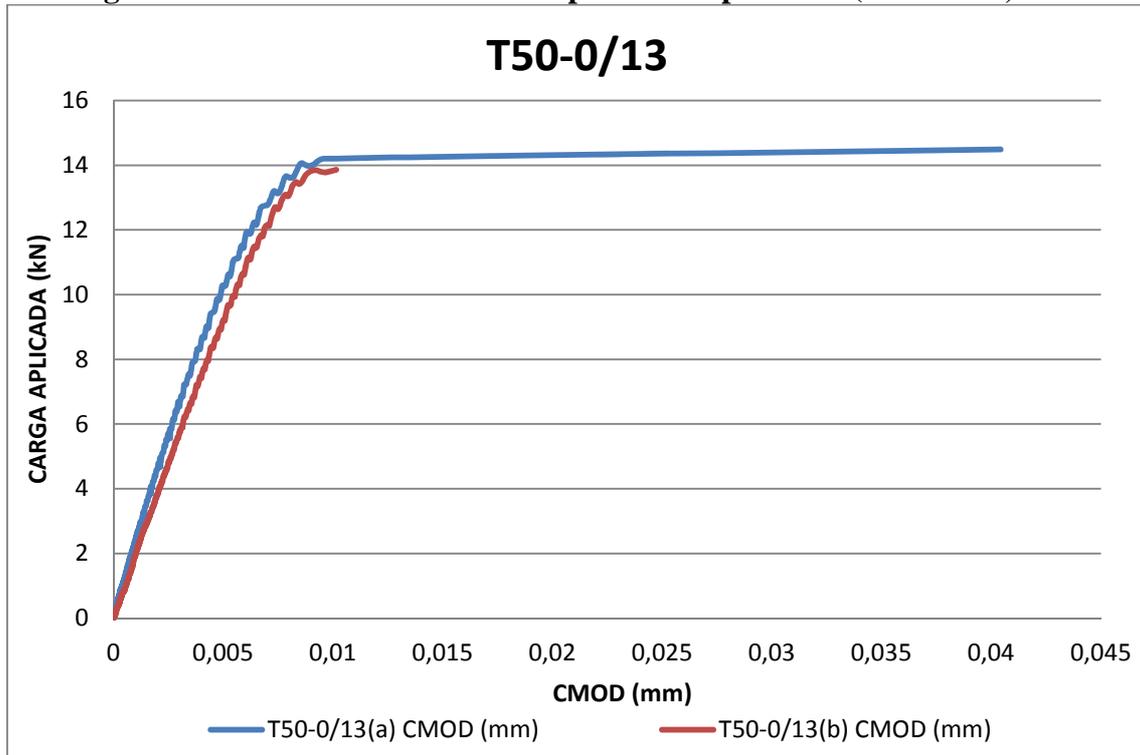


Figura B.0.26 - Deslocamento vertical para o compósito 13 (50% sílica, 0% fibra)

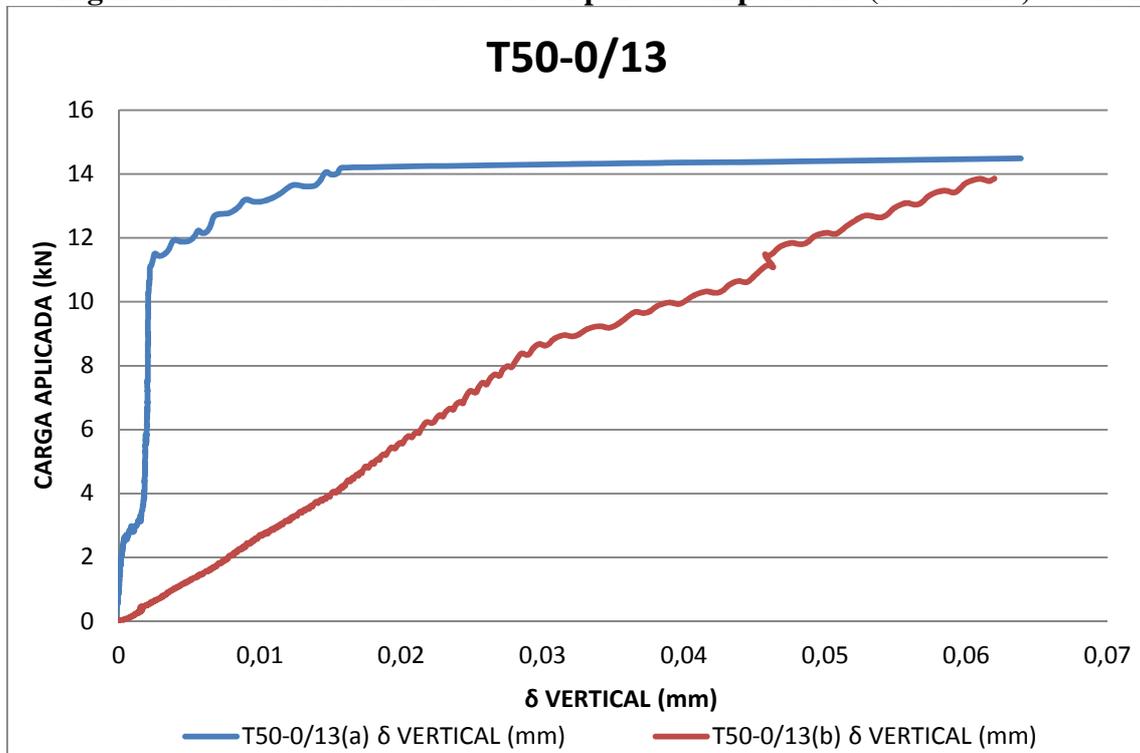


Figura B.0.27 - Abertura de fissura para o compósito 14 (50% sílica, 1% fibra)

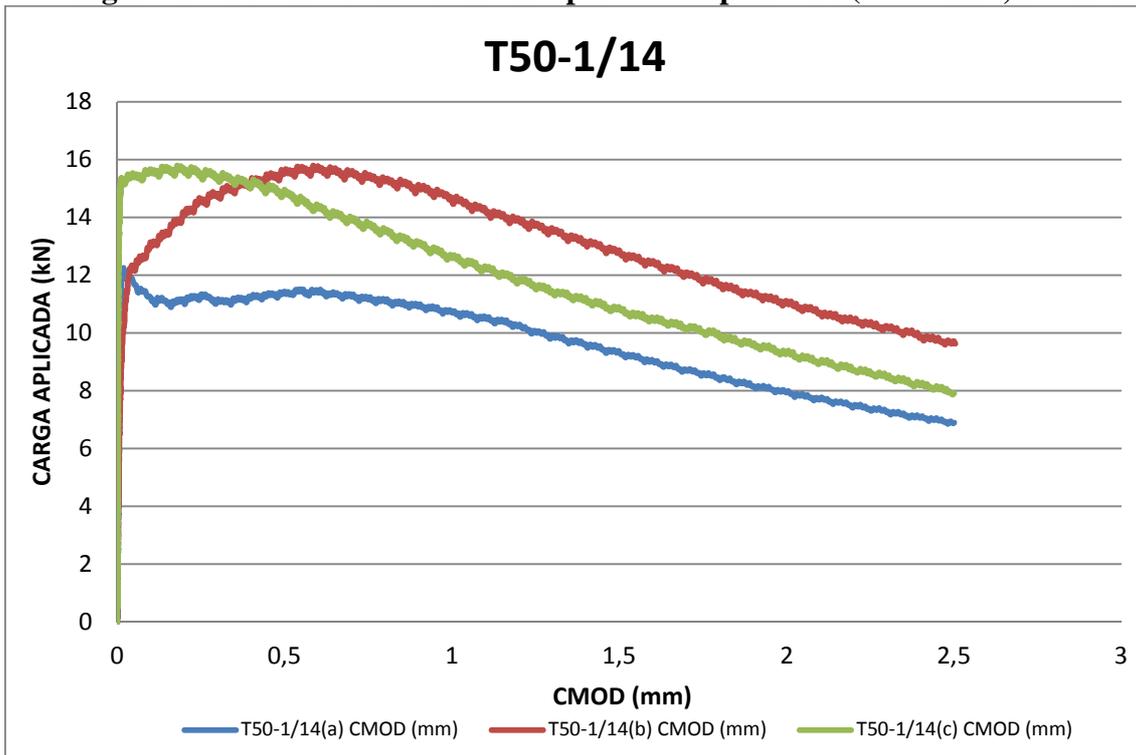


Figura B.0.28 - Deslocamento vertical para o compósito 14 (50% sílica, 1% fibra)

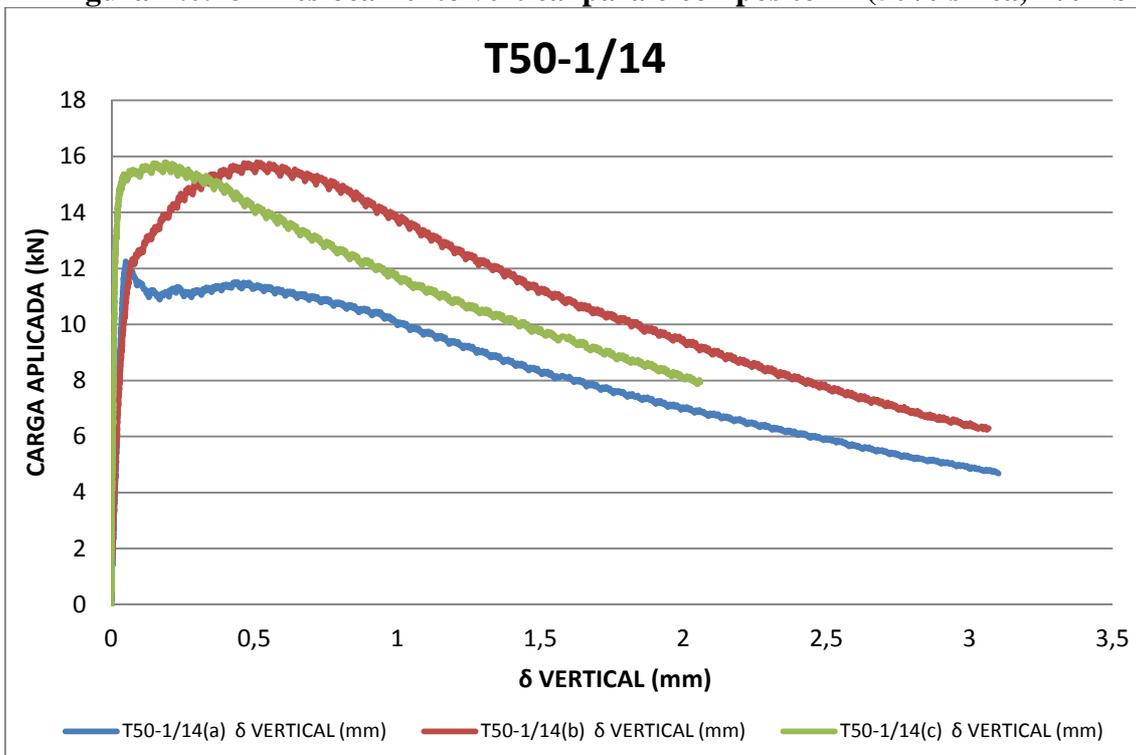


Figura B.0.29 - Abertura de fissura para o compósito 15 (50% sílica, 2% fibra)

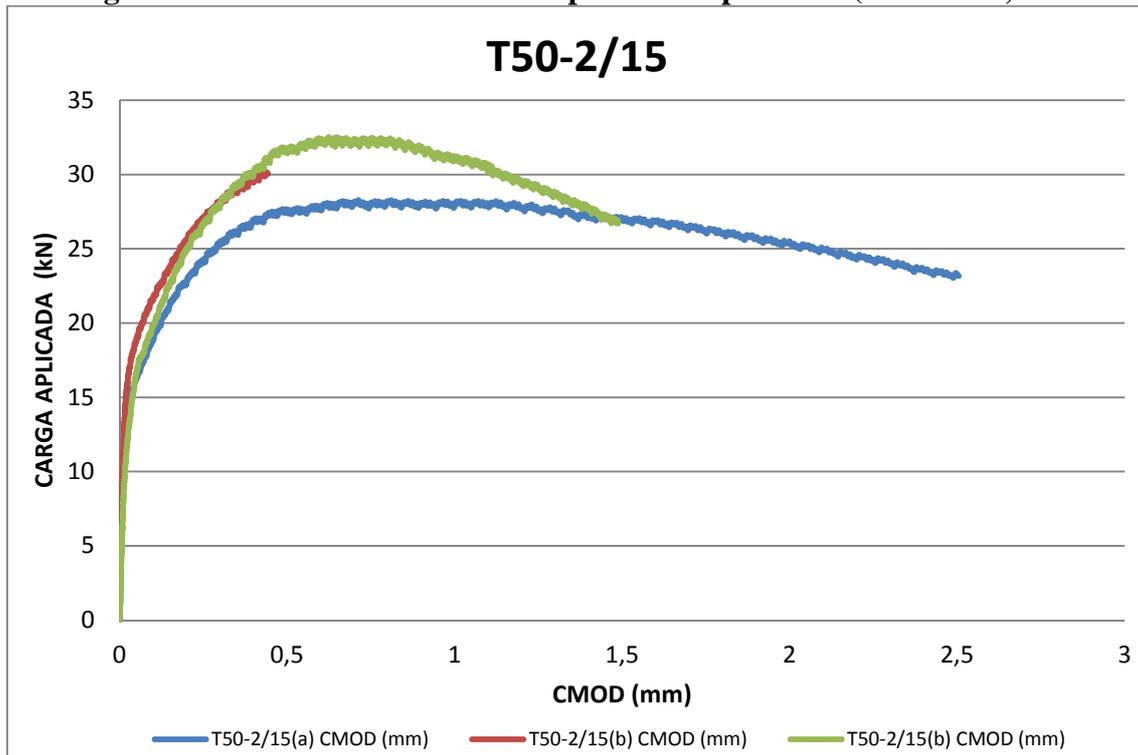


Figura B.0.30 - Deslocamento vertical para o compósito 15 (50% sílica, 2% fibra)

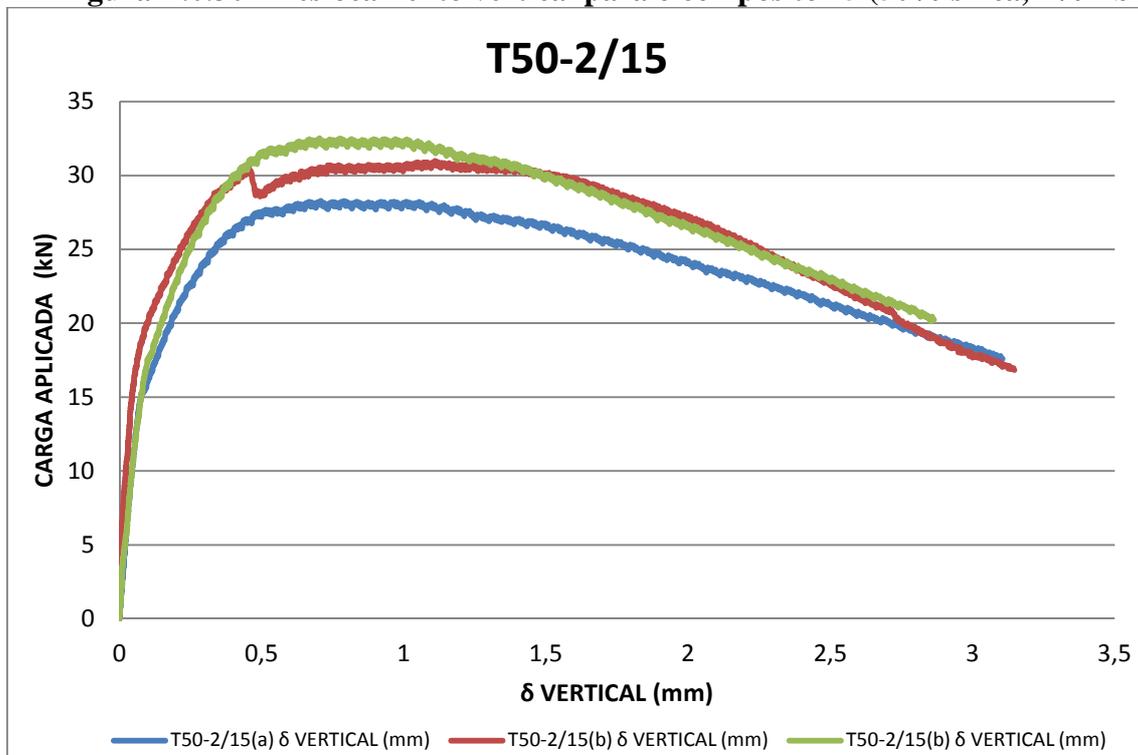


Figura B.0.31 - Abertura de fissura para o compósito 16 (50% sílica, 3% fibra)

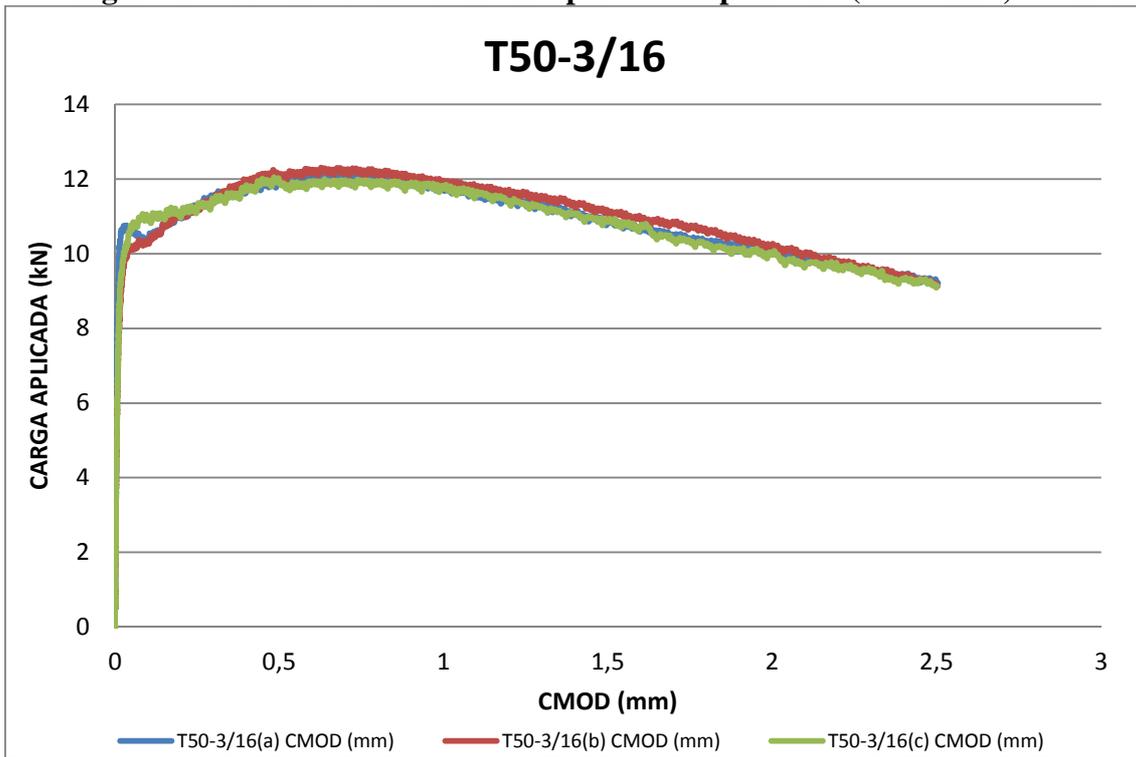


Figura B.0.32 - Deslocamento vertical para o compósito 16 (50% sílica, 3% fibra)

